

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

Uma Contribuição para o Pré-dimensionamento de Reservatórios Hidropneumáticos para Atenuação de Transitórios Hidráulicos

Edson Victor de Souza

Campinas 2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

Edson Victor de Souza

Uma Contribuição para o Pré-dimensionamento de Reservatórios Hidropneumáticos para Atenuação de Transitórios Hidráulicos

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos.

Orientador: Paulo Vatavuk

Campinas 2008

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

| So89c | Souza, Edson Victor de Uma contribuição para o pré-dimensionamento de reservatórios hidropneumáticos para atenuação de transitórios hidráulicos / Edson Victor de Souza Campinas, SP: [s.n.], 2008. |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Orientador: Paulo Vatavuk Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. |
| | Transitórios hidráulicos. 2. Golpe de ariete. 3. Vasos de pressão. 4. Reservatórios. 5. Desenho (Engenharia) - Dimensionamento. I. Vatavuk, Paulo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título. |

Titulo em Inglês: A contribution to the pre-sizing of air vessel to mitigation of waterhammer Palavras-chave em Inglês: Hydraulic transient, waterhammer, Pressure surge, Air vessel, Air chamber, Pré-sizing Área de concentração: Recursos Hídricos Titulação: Mestre em Engenharia Civil Banca examinadora: Edevar Luvizotto Júnior, Geraldo Lucio Tiago Filho Data da defesa: 25/01/2008 Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

UMA CONTRIBUIÇÃO PARA O PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS HIDROPNEUMÁTICOS PARA ATENUAÇÃO DE TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS

Edson Victor de Souza

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Paulo Watavuk Presidente e Orientador/FEC-UNICAMP

Prof. Dr. Edevar Luvizotto Júnior

Prof. Dr. Edevar Luvizotto Júnior FEC-UNICAMP

Prof. Dr. Geraldo Lucio Tiago Filho EFEI-UNIFEI

Campinas, 25 de janeiro de 2008

RESUMO

SOUZA, Edson Victor de. **Uma Contribuição para o Pré-dimensionamento de Reservatórios Hidropneumáticos para Atenuação de Transitórios Hidráulicos**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil - UNICAMP, 2008. 113p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2008.

O estudo do transitório hidráulico em condutos forçados tem grande relevância em projetos de sistemas de tubulações. A quantificação das pressões máximas e mínimas é de fundamental interesse para o projetista, a fim de que este possa dimensionar a tubulação e/ou prever dispositivos de proteção, cuja finalidade é amortecer as variações de carga, prejudiciais à vida útil da instalação. Neste trabalho optou-se pelo estudo de um destes dispositivos, o reservatório hidropneumático, que protege as instalações contra sobrepressões e subpressões, impedindo assim a descontinuidade do escoamento quando o sistema de bombeamento é desligado ou quando ocorre um fechamento rápido de válvula de bloqueio. O objetivo principal da presente pesquisa é o de formular tabelas e gráficos de aplicação para o pré-dimensionamento de reservatórios hidropneumáticos para a atenuação de transitórios hidráulicos em sistemas de condutos forçados, facilitando, desta maneira, o trabalho dos projetistas na escolha deste tipo de dispositivo de proteção de sistemas hidráulicos.

Palavras-chaves: transitório hidráulico, golpe de ariete, vaso de pressão, reservatório hidropneumático, pré-dimensionamento.

ABSTRACT

SOUZA, Edson Victor de. A Contribution to the Pre-sizing of Air Vessel to Mitigation of Waterhammer. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil - UNICAMP, 2008. 113p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2008.

The evaluation of hydraulic transients is very important in the design of pipe networks. The determination of the maximum and minimum pressures is of great interest to the designer, so that he can size the pipes and/or design protection devices, with the objective of decrease head variations, that can decrease the instalation life. In this work, one of those devices was chosen for study, the air vessel, that protects the instalation against overpressures and underpressures, avoiding the interruption of the flow when the pumping system is turned off or when a valve closes too fast. The present work has the main objective of making charts and graphs of application for pre-sizing of air vessels to the mitigation of Waterhammer in pressure pipes by facilitating, in this way, the work of designers in choosing this type of protection of hydraulic systems.

Keywords: hydraulic transient, waterhammer, pressure surge, air vessel, air chamber, presizing. DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa, Leandra, a minha filha, Ana Carolina, a minha mãe, Leontina, e em memória de meu pai, Sebastião, ambos exemplos de trabalho, dedicação, honestidade e seriedade.

AGRADECIMENTOS

- Primeiramente a DEUS;
- À minha querida esposa, Leandra Antunes, pelo incentivo e compreensão quando da minha ausência para a concretização deste trabalho;
- Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Vatavuk, por sua importante orientação e auxílio, cumprindo seu papel no decorrer do trabalho;
- Ao Prof. Dr. Edevar Luvizotto Júnior, por sua experiência e importantes sugestões, enriquecendo o presente trabalho;
- Aos colegas Mariana Rodrigues Reis Oliveira e Marco Antônio Costa e Silva, pelo auxílio operacional nas simulações hidráulicas;
- À empresa HagaPlan Planejamento e Projetos, que gentilmente cedeu ao projeto o programa HiTrans, em especial ao gerente José Carlos da Silva Ferreira e ao diretor José Eduardo Figueiredo Leite, pelo constante apoio e incentivo a este trabalho;
- Aos professores e funcionários do Departamento de Recursos Hídricos e da pós graduação da FEC-UNICAMP, em especial à Prof^a. Dra. Ana Ines Bori Genovez, ao Prof. Dr. Abel Maia Genovez e ao Prof. Dr. Paulo Sergio Franco Barbosa.
- Aos colegas e amigos da FEC-UNICAMP, especialmente à Cléucia Romeu Pousada e Luciana Vasques Correia da Silva, pela amizade e companheirismo;
- A todos os colegas da HagaPlan e amigos pela força positiva.

SUMÁRIO

| LISTA DE FIGURAS | ix |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| LISTA DE TABELAS | xi |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS | xii |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. OBJETIVO | 7 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 8 |
| 3.1. Trabalhos Pioneiros | 8 |
| 3.2. Trabalhos Baseados na Equação da Onda | 10 |
| 3.3. Trabalhos Baseados no Modelo Rígido | 11 |
| 3.4. Trabalhos Baseados no Modelo Elástico | 14 |
| 4. MODELAGEM MATEMÁTICA | 22 |
| 4.1. Equacionamento Geral | 22 |
| 4.2. Método das Características | 25 |
| 4.3. Equação Geral dos Nós | 29 |
| 4.4. Equação dos Elementos Não-tubo | 30 |
| 4.5. Simulações Matemáticas com o Auxílio de Ferramenta Computacional | 37 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 42 |
| 5.1. Validação do Programa TRANREDE | 42 |
| 5.2. Resultados do Programa TRANREDE para o Pré-dimensionamento de Reservatórios | |
| Hidropneumáticos | 63 |
| 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 76 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 78 |
| APÊNDICE A | 80 |
| APÊNDICE B | 97 |
| ANEXO 1 | 112 |
| ANEXO 2 (CD contendo as simulações hidráulicas utilizadas na pesquisa) | |

LISTA DE FIGURAS

| 1 - Gráfico mostrando a passagem de um regime permanenete para o transitório e retornando | ao |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| permanente | . 1 |
| 2 - Exemplo da ocorrência de um transitório hidráulico em um sistema de bombeamento | . 2 |
| 3 - Tipos de instalação de reservatório hidropneumático | . 5 |
| 4 - Exemplos de tipos de reservatórios hidropneumáticos | . 5 |
| 5 - Diagrama de M. Vibert para o cálculo simplificado dos reservatórios | |
| hidropneumáticos | 12 |
| 6 - Exemplo de solução gráfica para o reservatório hidropneumático, para linhas de recalque, | |
| com K=0,3 | 16 |
| 7 - Malha retangular para resolução das equações características | 27 |
| 8 - Representação do nó | 28 |
| 9 - Representação do reservatório | 32 |
| 10 - Instalação de um Reservatório Hidropneumático | . 32 |
| 11 - Topologia do sistema proposto | . 44 |
| 12 - Gráfico com os resultados da variação do nível de água no interior do reservatório | |
| hidropneumático ao longo do tempo durante o regime transitório | 48 |
| 13 - Gráfico com os resultados da variação da vazão do reservatório hidropneumático ao | |
| longo do tempo durante o regime transitório | 49 |
| 14 - Gráfico com os resultados da variação do volume de ar no interior do reservatório | |
| hidropneumático ao longo do tempo durante o regime transitório | 50 |
| 15 - Gráfico com os resultados da variação pressão do ar no interior do reservatório | |
| hidropneumático ao longo do tempo durante o regime transitório | 51 |
| 16 - Gráfico comparando as simulações com fechamento de válvula e com parada de bomba, | |
| utilizando o programa HiTrans, sem proteção contra os transitórios hidráulicos | 56 |

| 17 - Gráfico comparando as simulações com fechamento de válvula e com parada de bomba, | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| utilizando o programa HiTrans, com reservatório hidropneumático | 56 |
| 18 - Gráfico mostrando a vazão da bomba ao longo do tempo | 57 |
| 19 - Topologia do exemplo apresentado por Parmakian | 59 |
| 20 - Solução gráfica para o reservatório hidropneumático, com K=0,3, mostrando os valores | |
| descritos no exemplo apresentado por PARMAKIAN (1963) | 61 |
| 21 - Topologia do exemplo apresentado por Parmakian, adaptado para o programa | |
| TRANREDE | 62 |
| 22 - Exemplo de apresentação de uma tabela de pré-dimensionamento para reservatórios | |
| hidropneumáticos, apresentada no Apêndice A. | 68 |
| 23 - Exemplo de apresentação de um gráfico resultante das simulações hidráulicas, em regime | • |
| transitório, apresentado no Apêndice B. | 68 |
| 24 - Topologia do exemplo 1 | 70 |
| 25 - Pré-dimensionamento do reservatório hidropneumático do exemplo 1, utilizando-se a tabe | ela |
| A9 do apêndice A | 71 |
| 26 - Gráfico B8 do apêndice B, para determinação da vazão em regime permanente para | |
| tubulação principal DN 600 mm do exemplo 1 | 72 |
| 27 - Topologia do exemplo 2 | 73 |
| 28 - Pré-dimensionamento do reservatório hidropneumático do exemplo 2, utilizando-se a tabe | ela |
| A9 do apêndice A | 74 |
| 29 - Gráfico B8 do apêndice B, para determinação da vazão em regime permanente para | |
| tubulação principal DN 600 mm do exemplo 2 | 75 |

LISTA DE TABELAS

| 1 - Relação de ábacos para dimensionamento e verificação hidráulica de reservatórios | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| hidropneumáticos | 10 |
| 2 - Perdas de carga de entrada e saída do reservatório hidropneumático | 46 |
| 3 - Características principais do exemplo apresentado por Parmakian, conforme Figura 17 | 59 |
| 4 - Dados dos tubos de ferro dúctil utilizados | 112 |
| 5 - Pressões de Serviço Admissíveis - Tubo Junta Elástica Classe K9 | 113 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

| Abreviatura /símbolo | Descrição | Unidade SI |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| МОС | Método das Características | - |
| RHO | Reservatório Hidropneumático | - |
| RHT | Rational Heat Transfer | - |
| TRANREDE | Programa para simulações de transitórios hidráulicos, desenvolvido pelo Prof. Dr. Paulo Vatavuk | - |
| Α | área da seção transversal da tubulação | m^2 |
| A_R | área da seção transversal do reservatório hidropneumático | m^2 |
| a | celeridade de propagação da onda de pressão | m/s |
| С | razão entre volume de ar comprimido no reservatório hidropneumático e seu volume de ar inicial em regime permanente ($c=C/C_0$) | adimensional |
| C^+, C^- | retas características positiva e negativa | - |
| C_D | coeficiente de descarga da válvula | adimensional |
| C_p | calor específico à pressão constante | cal/g °C |
| Cv | calor específico à temperatura constante | $cal/cm^3 ^{o}C$ |
| D | diâmetro da tubulação principal | mm |
| DI | diâmetro interno da tubulação | mm |
| DN | diâmetro nominal da tubulação | mm |
| D(t) | demanda no nó | m^3/s |
| e | espessura de parede da tubulação principal | mm |
| Ε | módulo de elasticidade do material da tubulação principal | N/m^2 |
| f | fator de atrito de Darcy-Weisbach | adimensional |
| g | aceleração da gravidade | m/s^2 |
| h_0 | carga cinética em regime permanente | m |
| Н | carga piezométrica instantânea | т |

| Abreviatura /símbolo | Descrição | Unidade SI | |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--|
| H_0 | carga piezométrica em regime permanente | m | |
| H_1 | carga piezométrica na saída da bomba | т | |
| ${H_0}^*$ | carga piezométrica absoluta em regime permanente | m | |
| H_J | carga piezométrica, segundo Joukowsky (ver tabela 1) | т | |
| H _{máx} | sobrepressão máxima durante o transitório hidráulico | т | |
| $H_{mín}$ | subpressão mínima durante o transitório hidráulico | т | |
| H_N | carga piezométrica no nó | m | |
| Нр | carga piezométrica num ponto P | m | |
| H_R | carga piezométrica no reservatório | m | |
| H_{Ro}^{*} | carga piezométrica absoluta inicial interna no reservatório hidropneumático, em regime permanente (ver tabela 1) | т | |
| ΔH | variação de carga piezométrica | т | |
| ΔH_0 | variação de carga piezométrica em regime permanente | m | |
| ΔH_{Co} | perda de carga distribuída, em regime permanente (ver tabela 1) | т | |
| ΔH_{Lo} | perda de carga localizada, em regime permanente (ver tabela 1) | m | |
| ΔH_T | perda de carga distribuída (ver tabela 1) | m | |
| k | coeficiente de expansão dos gases (ar) | adimensional | |
| ke | coeficiente de perda de carga na tubulação de entrada do reservatório hidropneumático | adimensional | |
| ks | coeficiente de perda de carga na tubulação de saída do reservatório hidropneumático | adimensional | |
| Κ | módulo de elasticidade volumétrica do líquido | N/m^2 | |
| L | comprimento do tubo | m | |
| L/a | período das ondas | S | |
| n D | coeficiente da transformação politrópica | adimensional Da | |
| | | Fa | |
| P _{atm} | pressao atmosferica | Pa | |
| p_e | pressão absoluta estática no reservatório hidropneumático | Pa | |
| p_i | pressão inicial do ar no reservatório hidropneumático em regime permanente | Ра | |
| Δp | sobrepressão no reservatório hidropneumático | Pa | |
| Q | vazão no instante de cálculo atual | <i>m³/s</i> | |
| Q_0 | vazão em regime permanente | m³/s | |
| Q_E | vazão que segue para o elemento não-tubo no instante anterior | m^3/s | |

| Abreviatura /símbolo | Descrição | Unidade SI | |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--|
| Q_P | vazão num ponto P | <i>m³/s</i> | |
| Q_{PE} | vazão de um elemento não-tubo | m^3/s | |
| t | instante de tempo | S | |
| Δt | variação do instante de tempo | S | |
| V | velocidade média na tubulação principal | m/s | |
| v_0 | velocidade inicial na tubulação principal, em regime permanente | m/s | |
| \forall | volume de ar instantâneo no reservatório hidropneumático | m^3 | |
| $ at {0}$ | volume de ar em regime permanente no reservatório hidropneumático | <i>m</i> ³ | |
| $\varDelta \forall$ | variação do volume de ar no reservatório hidropneumático em função de Q_{PE} | <i>m</i> ³ | |
| x | distância ao longo da tubulação | т | |
| z_0 | nível de ar no reservatório hidropneumático no instante anterior | т | |
| Z _N | cota no nó de junção do reservatório hidropneumático com o eixo da tubulação principal | т | |
| Z_R | cota no reservatório hidropneumático entre o ponto médio do nível de ar e o eixo da tubulação principal | | |
| α | constante genérica para transferência de calor | adimensional | |
| γ | peso específico do líquido | <i>N/m</i> ³ | |
| η | adimensional característico da válvula | adimensional | |
| λ_R | coeficiente de energia do reservatório hidropneumático | adimensional | |
| ρ | massa específica do líquido | kg/m³ | |
| $\rho*$ | característica da tubulação principal (ver equação 5.5) | adimensional | |
| τ | tensão de atrito | adimensional | |
| $	au_{ws}$ | tensão de atrito válida para o regime permanente | adimensional | |

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas hidráulicos caracterizados como condutos forçados podem sofrer alterações nas condições de escoamento, ocorrendo variação de pressão e de velocidade de escoamento do fluido em função do tempo, ocasionando regimes variáveis.

Denomina-se transitório hidráulico ou golpe de ariete, o regime variável que ocorre durante a passagem de um regime permanente para outro regime permanente, conforme mostrado na **figura 1**.



Figura 1. Gráfico mostrando a passagem de um regime permanenete para o transitório e retornando ao permanente.

Assim, qualquer alteração brusca no movimento ou paralisação eventual de um elemento do sistema dá origem aos chamados fenômenos transitórios. Após a ocorrência da perturbação, como o fechamento rápido de uma válvula, parada de turbina ou o desligamento de uma bomba, o regime permanente presente antes da perturbação é alterado, dando origem a um

regime transitório que posteriormente retornará ao regime permanente. A **figura 2** exemplifica a ocorrência de um transitório hidráulico em um sistema de bombeamento.



Figura 2. Exemplo da ocorrência de um transitório hidráulico em um sistema de bombeamento.

O transitório hidráulico em conduto forçado é um processo onde ocorrem deformações tanto no líquido quanto na tubulação, caracterizando-se pela ocorrência de ondas de pressão que se propagam ao longo da tubulação sempre que, por alguma razão, o escoamento sofrer aceleração ou desaceleração.

O estudo e a análise do transitório hidráulico em condutos forçados já foi desenvolvido por inúmeros pesquisadores no mundo todo, sendo que na revisão bibliográfica traz-se um pouco deste histórico, direcionando as referências ao trabalho em epígrafe.

O estudo do transitório hidráulico em condutos forçados tem grande relevância em projetos de sistemas de tubulações. Também tem grande importância quantificar as cargas

hidráulicas máximas e mínimas, bem como a freqüência dessas oscilações. Quando esta análise não é considerada, pode ocorrer uma série de problemas, tais como:

- Rompimento da parede de tubulações devido aos efeitos de sobrepressões;
- Estrangulamento do tubo devido aos efeitos da subpressão (pressões inferiores à pressão atmosférica) ou separação da coluna líquida;
- Rompimento das tubulações por fadiga, devido às constantes oscilações no sistema;
- Queima de motor elétrico, devido a rotação reversa de bomba;
- Destruição de instalações, perda de bens materiais e vidas humanas;

Desse modo, a quantificação das pressões máximas e mínimas é de fundamental interesse para o projetista, a fim de que este possa dimensionar a tubulação e/ou prever dispositivos de proteção, cuja finalidade é amortecer as variações de carga, prejudiciais à vida útil da instalação.

Existe uma série de dispositivos para proteção de instalações hidráulicas contra os efeitos dos transitórios, tais como Chaminé de Equilíbrio, Tanque Unidirecional, Reservatório Hidropneumático, Válvula Antecipadora de Onda, Válvulas de Alívio, Ventosas, Volantes de Inércia, entre outros.

Neste trabalho optou-se pelo estudo de um destes dispositivos, o reservatório hidropneumático, também conhecido como vaso de pressão, que protege as instalações contra sobrepressões e subpressões, impedindo assim a descontinuidade do escoamento quando o sistema de bombeamento é desligado ou quando ocorre um fechamento rápido de válvula de bloqueio.

O reservatório hidropneumático caracteriza-se por ser um tanque metálico de formato cilíndrico, fechado hermeticamente, instalado diretamente na tubulação principal ou numa derivação, conforme mostra a **figura 3**, tendo em seu interior água e ar comprimido. Atualmente, existem diversos fabricantes e tipos de reservatório hidropneumático no mercado, conforme apresentado na **figura 4**, destacando-se, entre outros:

- Tanque fabricado "in loco", não tendo separação entre o ar e o líquido transportado. Este tipo de tanque pode ser utilizado para qualquer tipo de líquido e qualquer valor de vazão. O incoveniente deste dispositivo é a permanente mistura do ar no líquido, requerendo, portanto, a implantação em conjunto com um compressor de ar;
- Tanque contendo bolsa elastomérica (tipo de membrana em borracha butílica) –
 exemplo de fabricante: BUGATTI BRASIL. Esta bolsa é responsável pela
 separação do ar comprimido e do líquido transportado. Recomenda-se que este
 tipo de reservatório hidropneumático seja utilizado apenas com água limpa,
 evitando-se líquidos contendo materiais que possam danificar a parede da
 membrana em seu interior. Também deve-se prever a instalação de um compressor
 para completar o ar comprimido no interior do tanque, pois pode-se haver perda de
 ar pela válvula de entrada;
- Tanque contendo múltiplos elementos (cápsulas) volumétricos expansíveis com ar comprimido – exemplo de produto: HYDROBALLS, comercializado pela HISA Hidráulica Industrial S.A. O fabricante especifica que o mesmo pode ser utilizado para qualquer tipo de líquido, não necessitando de instalação de compressor para completar o ar comprimido no interior das cápsulas.

A decisão de pesquisar este dispositivo de proteção deve-se principalmente à ampla aplicabilidade em diversas situações de ocorrência do transitório hidráulico. Outra questão importante é de aprofundar os estudos à respeito deste dispositivo, buscando facilitar prédimensionamentos e a sua proposição nos projetos de sistemas de condutos forçados. Isto porque, mesmo com os inúmeros programas de mercado para cálculo de transitórios hidráulicos, ainda no Brasil diversos projetistas de sistemas hidráulicos têm dificuldade na obtenção de tais ferramentas computacionais ou mesmo pouca habilidade na sua operação.



1. Reservatório hidropneumático instalado na tubulação de recalque (tubulação principal).



2. Reservatório hidropneumático instalado numa derivação da tubulação de recalque (tubulação principal).

Figura 3. Tipos de instalação de reservatório hidropneumático



Figura 4. Exemplos de tipos de reservatórios hidropneumáticos

Assim sendo, os estudos elaborados na presente dissertação estão apresentados da seguinte maneira:

 O capítulo 3 apresenta, além do resgate histórico dos estudos referentes ao escoamento transitório e, mais especificamente, sobre os reservatórios hidropneumáticos, também a caracterização e um diagnóstico dos recentes estudos para estes dispositivos de proteção;

- Na seqüência, no capítulo 4, serão apresentados os equacionamentos para o escoamento em regime transitório e para dimensionamento dos reservatórios hidropneumáticos, tanto em regime permanente, quanto durante um transitório hidráulico;
- O capítulo 5 contempla os resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho, tendo como principal produto tabelas e gráficos de pré-dimensionamento de reservatórios hidropneumáticos, procedendo-se uma análise e discussão sobre os mesmos.
- No capítulo 6 são apresentadas as conclusões, considerações finais e propostas para trabalhos futuros.

2. OBJETIVO

O objetivo principal dessa dissertação é o de formular tabelas e gráficos de aplicação para o pré-dimensionamento de reservatórios hidropneumáticos para a atenuação de transitórios hidráulicos em sistemas de condutos forçados, facilitando, desta maneira, o trabalho dos projetistas na escolha deste tipo de dispositivo de proteção de sistemas hidráulicos.

Para tanto, desenvolveu-se um modelo computacional durante a pesquisa, validando-o e assim poder efetuar as simulações hidráulicas em regime transitório necessárias para a obtenção dos resultados pretendidos para a aplicação em diversas situações.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Trabalhos Pioneiros

Uma das primeiras informações de aplicação do reservatório hidropneumático consta de 1878, onde J. Michaud descreveu a sua utilização como proteção de sistemas hidráulicos (MARTINS, 1980).

Segundo ALMEIDA e KOELLE (1992), Joukowski realizou inúmeros testes em Moscou, em 1897, destacando-se a demonstração de que o aumento de pressão em sistemas de recalque é causado pelo fechamento repentino de uma válvula, sendo idêntico do fenômeno acústico. Segundo MARTINS (1980), no início do século XX, Joukowski confirmou experimentalmente a utilidade do reservatório hidropneumático como dispositivo de proteção. Admitindo transformação adiabática do ar, deduziu uma expressão para determinação do volume de ar (\forall), para que a sobrepressão não excedesse um certo valor. Essa expressão é função do diâmetro da tubulação principal (*D*), do coeficiente de transformação politrópica (*n*), da velocidade de regime permanente (V_0), do período das ondas (L/a), da pressão absoluta inicial do ar no reservatório hidropneumático em regime permanente (p_i), da pressão absoluta estática no reservatório hidropneumático (p_e) e da sobrepressão no reservatório hidropneumático (Δp), a saber:

$$\forall = \frac{n\pi}{2} D^2 V_0 \left(\frac{2L}{a}\right) \frac{p_i^2}{p_e \Delta_p}$$
(3.1)

Segundo ALMEIDA e KOELLE (1992), Allievi, que estabeleceu as equações diferenciais e as resolveu, também no início do século XX, levando em consideração a compressibilidade do líquido e a deformação da tubulação, de modo a elaborar um ábaco para determinação de sobrepressões em manobras de válvula. Segundo MARTINS (1980), ele adaptou o seu estudo para sistemas de recalque munidos de reservatório hidropneumático, considerando em seus estudos a transformação isotérmica do ar.

ALLIEVI (1937) destaca-se como um dos principais pesquisadores dos transitórios hidráulicos, tendo publicado em 1903 seu primeiro trabalho entitulado "Water-Hammer Theory" e desde então contribuído muito para o desenvolvimento e entendimento deste fenômeno. Destaca-se também como um dos pesquisadores que elaborou ábacos para a solução de equações de transitórios hidráulicos. Especificamente com relação ao reservatório hidropneumático, ele desenvolveu estudos a respeito do equacionamento para o funcionamento deste dispositivo durante o regime transitório, ocasionado pela parada de um sistema de bombeamento. Allievi determinou equações para o dimensionamento de reservatórios hidropneumáticos, dando ênfase às perdas na tubulação de interligação com este dispositivo.

Segundo MARTINS (1980), no período compreendido entre os estudos efetuados por Joukowski e Allievi e o advento do computador, o estudo sobre reservatório hidropneumático teve basicamente três bases teóricas:

- Estudos baseados na equação da onda, obtida por B.Riemann;
- Equacionamento de coluna rígida;
- Equacionamento de coluna elástica.

Especificamente quanto a formulação de ábacos para dimensionamento e verificação hidráulica de reservatórios hidropneumáticos, ALMEIDA E KOELLE (1992) citam em seu livro alguns dos autores mais utilizados, conforme mostra a **tabela 1**.

| Autor | Ano | Parâmetros | Observações (1) | |
|-------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Vibert | 1950 | L/à n | Modelo rígido | |
| VIDEIL | | L/λ_R | simplificado (n=1) | |
| Sliosberg | 1952 | $L/$ $\Delta H_{T}/$ | Modelo rígido | |
| Shosberg | 1952 | $/\lambda_{R}$, $/H_{R_{0}}$ | simplificado (n=1) | |
| Combes e Borot | 1952 | L_{λ_R} ; $\overset{\Delta H_{L_0}}{H_{R_0}}$; $\overset{\Delta H_{C_0}}{H_{R_0}}$; $\overset{\Delta H_{C_0}}{H_{R_0}}$ | Modelo rígido | |
| Combes e Borot | | | simplificado (n=1) | |
| Dubin a Guanaau | 1055 | $\overline{\alpha}$ 2/ ΔH_{L_0} | Modelo elástico (método | |
| Dubin e Gueneau | 1955 | $\mathcal{P}, \mathcal{I}_{\lambda_{R}}, \mathcal{I}_{H_{R_{0}}}^{*}$ | gráfico e n=1) | |
| Dormolrion | 1963 | $\frac{10}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{(\Delta H_{c_0} + \Delta H_{L_0})}{(\Delta H_{c_0} + \Delta H_{L_0})}$ | $\frac{1}{\alpha_{1}} \frac{1}{\alpha_{2}} \frac{1}{\alpha_{1}} \left(\Delta H_{C_{0}} + \Delta H_{L_{0}} \right) / \frac{1}{\alpha_{1}}$ | Modelo elástico (método |
| Parmakian | | $\rho,\rho n_R,$ $/H^*_{R_0}$ | gráfico e n=1,2) | |
| Paoletti | 1072 | $\overline{\rho}$ $1/2$ $\Delta H_{c_0}/2$ $\Delta H_{L_0}/2$ | Modelos elásticos e | |
| Taoletti | 1972 | $\beta', \lambda_{R}', M_{R_0}^*, M_{R_0}^*$ | rígidos (comparações) | |
| Ruus | 1977 | $\overline{\rho_{c_0}} \Delta H_{c_0} / \Delta H_{L_0} / \Delta H_{$ | Modelo elástico (MOC e | |
| ixuus | 1977 | $H_{R_0}^*$, $H_{R_0}^*$, $H_{R_0}^*$ | n=1,2) | |
| Meunier e Puech | 1978 | $\overline{\rho}; \frac{1}{2}; \frac{\Delta H_{C_0}}{\mu^*}; \frac{\Delta H_{L_0}}{\mu^*}$ | Modelo elástico (n=1,2) | |
| | | $/2n_R$ $/H_{R_0}$ $/H_{R_0}$ | | |
| Fok | 1978 | $\overline{\rho}; \overline{\rho} \lambda_{R}; \Delta H_{C_0} / H^*; \Delta H_{L_0} / H^*$ | Modelo elástico (n=1,2) | |
| | | $/ \Pi_{R_0} / \Pi_{R_0}$ | | |
| Graze e Horlacher | 1986 e 1990 | $\left. \frac{-}{\rho \lambda_{R}} \right\} \left. \frac{\Delta H_{C_{0}}}{H} \right\} \left. \frac{\Delta H_{L_{0}}}{H} \right\}$ | Modelo elástico | |
| | | / 11 / 11 / | | |

Tabela 1. Relação de ábacos para dimensionamento e verificação hidráulica de reservatórios hidropneumáticos

(1) Observações quanto ao modelo matemático utilizado: Modelos elásticos são considerados pelos autores mais precisos.

Fonte: ALMEIDA e KOELLE (1992), pg. 218.

3.2. Analogias das Equações de Transitórios às Equações da Onda

Segundo MARTINS (1980) os estudos baseados na equação da onda, obtida por B.Riemann em 1859, apresentam um equacionamento representativo do reservatório hidropneumático. Esse tratamento foi feito com auxílio da relação das transformações politrópicas e de parâmetros que definem o comportamento da tubulação e das condições de contorno.

3.3. Trabalhos Baseados no Modelo Rígido

O modelo de estudo baseado no equacionamento de coluna rígida foi proposto por estudiosos que desprezaram os efeitos da compressibilidade do líquido e da deformação da tubulação, por considerarem sem grande importância.

O resultado deste equacionamento para um sistema provido de reservatório hidropneumático e redução instantânea de vazão é apresentado em forma de ábaco por Joukowski e Dupont, ou por gráficos através de Evangelisti e Sliosberg. Este equacionamento também foi recomendado por Dupont, e por conseguinte o Ábaco de Vibert, conforme mostra a **figura 5** (MARTINS, 1980).

O método de cálculo utilizando-se o Diagrama de Vibert, consiste na seguinte seqüência:

- Tendo-se o comprimento da tubulação à jusante do reservatório hidropneumático, o diâmetro e o material da tubulação principal, a vazão na tubulação e a diferença de carga, calcula-se primeiramente a celeridade;
- 2. Calcula-se a sobrepressão máxima;
- Determina-se o valor da razão entre a sobrecarga máxima pela carga piezométrica inicial, conforme mostra a equação 3.2;

$$\frac{H_{máx}}{H_0}$$
(3.2)



Figura 5. Diagrama de M. Vibert para o cálculo simplificado dos reservatórios hidropneumáticos (MACINTYRE, 1997)

4. Determina-se o valor da razão entre a carga cinética em regime permanente, denominada h₀, pela carga piezométrica inicial, conforme mostra a equação 3.3;

$$\frac{h_0}{H_0}$$
(3.3)

- Marca-se no diagrama de Vibert, figura 5, os valores obtidos nas equações 3.2 e
 3.3, ligando-os por uma reta;
- 6. Obtem-se, desta forma, \forall_0/LA , ou seja, o volume de ar no reservatório hidropneumático no regime permanente dividido pela extensão da tubulação (L)

multiplicada pela seção do tubo (A). Como tem-se os valores de L e A, por esta expressão pode-se obter o volume de ar do reservattório hidropneumático;

Este método de dimensionamento de reservatório hidropneumático é bastante prático, no entanto Vibert o criou limitado para sistemas com vazão máxima de 0,03 m³/s e comprimento de tubulação principal até 1.200 m (MARTINS, 1980). Como os valores nele expressos são apresentados em escala logarítmica, pode ampliar sua abrangência para as necessidades de cada sistema estudado.

Para os casos em que o uso da teoria de fluídos incompressíveis pode ser considerado impreciso, vários autores já sugeriram ábacos para dimensionamento de reservatórios hidropneumáticos obtidos a partir a equação da conservação da quantidade de movimento.

GIUSEPPE DE MARTINO et al (2002) cita que na década de 1930 o professor Evangelisti estudou bastante as condições e características dos reservatórios hidropneumáticos, propondo gráficos para auxiliar no dimensionamento de tais dispositivos. Além disso, nestes estudos, Evangelisti apresentou a expressão analítica para calcular as subpressões e sobrepressões, destacando-se os efeitos da perda de carga e da relação entre calor especifico à pressão constante e à volume constante no processo politrópico no fenômeno.

Em 1936, Evangelisti apresentou a teoria para fluídos incompressíveis, sendo que esta mostrou-se confiável quando a variação da pressão máxima é menor que a metade da sobrepressão ocasionada por um fechamento instantâneo de uma válvula. No entanto, segundo GIUSEPPE DE MARTINO et al (2002), esta restrição não é relevante para maioria das aplicações práticas.

ANGUS (1937), seguindo preceitos de Joukowski e Allievi, apresentou equações, associando-as a soluções gráficas para determinação dos transitórios hidráulicos ocasionados a partir da parada do bombeamento ou devido a abertura e fechamento de válvulas. Ele selecionou vários tipos de linha de recalque e apresentou graficamente os resultados dos transitórios hidráulicos, prevendo a implantação de reservatórios hidropneumáticos junto às bombas e também com este dispositivo ao longo da linha de recalque.

DAWSON E KALINSKE (1939) apresentaram soluções gráficas para cálculos de transitórios hidráulicos e, especificamente, para a determinação das pressões máximas em condutos equipados com reservatório hidropneumático. Os dados experimentais apresentados pelos autores foram obtidos em ensaios com tubulações de ferro de 1" de diâmetro e extensão de 100 ft ou 30,48 metros; os ensaios de Enger foram efetuados em tubulações de 2" de diâmetro (material não divulgado) e extensão de 730 ft ou 222,5 metros; e os ensaios de Kessler foram realizados em tubulações de ferro galvanizado de 1" de diâmetro e extensão variando entre 50 ft (15,24 metros) e 400 ft (121,92 metros).

WOOD (1970) também estudou reservatórios hidropneumáticos, propondo, a partir de diversas simulações hidráulicas, gráficos e ábacos. Estas simulações foram feitas em uma instalação teórica, que depois foi comparada com resultados laboratoriais, e assim pôde-se validar os métodos analíticos utilizados.

WOOD (1970) enfatiza que a utilização do reservatório como dispositivo de proteção deve ser precedida por análises e simulações hidráulicas dos sistemas em regime transitórios, evitando-se danos aos sistemas projetados.

3.4. Trabalhos Baseados no Modelo Elástico

Quanto ao equacionamento de coluna elástica, foram desenvolvidos estudos considerando-se os efeitos da compressibilidade do líquido e da deformação da tubulação.

3.4.1. Métodos gráficos para determinação de reservatórios hidropneumáticos

Segundo MARTINS (1980), o grande impulso do modelo elástico se deu através da divulgação do método gráfico de Schneyder-Bergeron em 1950. Esse método pode levar em consideração ou não as perdas de carga ao longo da tubulação e na entrada do reservatório hidropneumático.

O método gráfico possibilita boa visão do fenômeno físico, apresentando vantagens didáticas e muitas vezes de análise (MARTINS, 1980).

Vários autores elaboraram ábacos característicos tanto para o cálculo dos transitórios hidráulicos nas tubulações, quanto para a determinação de reservatório hidropneumático. Dentre estes pesquisadores, destaca-se Parmakian, o qual publicou seus trabalhos na primeira edição de seu livro em 1955, e que ainda continua, até os dias atuais, sendo muito utilizado tanto no cálculo de transitórios hidráulicos, quanto no dimensionamento de dispositivos de proteção contra seus efeitos.

PARMAKIAN (1963) apresentou ábacos para diferentes perdas de carga definidas como porcentagem da altura total quando o escoamento se dá desde a tubulação principal até o reservatório hidropneumático, com vazão nominal. A porcentagem fornecida engloba a perda distribuída ao longo da linha e a localizada na entrada do reservatório hidropneumático.

Estes ábacos são resultados de estudos matemáticos e de laboratório desenvolvidos, anteriormente à primeira edição do livro de Parmakian em 1955, pelos professores dos cursos de graduação e pós-graduação de engenharia da Universidade do Colorado. O material publicado no livro foi utilizado durante diversos anos como principal referência para analisar o fenômeno dos transitórios hidráulicos nas maiores estruturas hidráulicas projetadas pelo Bureau of Reclamation.

Na **figura 6,** K é a relação entre a perda de carga total em uma impulsão, incluída a perda no orifício do tanque, e a pressão absoluta no tanque, ou seja:

$$K = \frac{Perdas}{H_0^*}$$
(3.4)

e ρ^* , um adimensional, que representa uma característica da tubulação, sendo:

$$2\rho^* = \frac{a \cdot V_0}{g \cdot H_0^*} \tag{3.5}$$



Figura 6. Exemplo de solução gráfica para o reservatório hidropneumático, para linhas de recalque, com K=0,3 (PARMAKIAN, 1963)

Além disso, o termo adimensional apresentado na abscissa, $\frac{2\forall_0 a}{Q_0 L}$, do ábaco da **figura 6**

corresponde a uma característica do reservatório hidropneumático.

3.4.2. Estudos recentes envolvendo os reservatórios hidropneumáticos

Mais recentemente alguns pesquisadores vêm dando uma grande importância quanto à escolha do tipo de dispositivo de proteção contra os efeitos de transitórios hidráulicos, como é caso de BOULOS et al (2005), que relatou uma caracterização básica do fenômeno físico de transitório hidráulico, apresentando diretrizes práticas para sua supressão e controle, além de comparar o equacionamento e o desempenho computacional das simulações em regime transitório. De maneira resumida, destacou as principais conseqüências que as ondas formadas durante o regime transitório podem ocasionar ao sistema de distribuição de água, como sendo:

- Sobrepressão e subpressão no sistema;
- Cavitação;
- Vibração das tubulações;
- Riscos de ocorrência de contaminação da água devido a infiltrações nas juntas e conexões das tubulações.

BOULOS et al (2005) ainda destacou que as principais causas da ocorrência do transitório hidráulico estão relacionadas à partida e parada repentina de conjuntos elevatórios e a abertura e o fechamento rápido de válvulas. A ocorrência do transitório pode trazer danos graves às instalações hidráulicas, sendo que para o controle e amortecimento dos transitórios hidráulicos, os autores citam os seguintes dispositivos:

- Instalação de válvula de retenção;
- Implantação de by-pass em sistemas de bombeamento;
- Chaminé de Equilíbrio;
- Tanque Unidirecional;
- Reservatório Hidropneumático;
- Válvula Antecipadora de Onda;
- Válvulas de Alívio;
- Ventosas.

A escolha do dispositivo mais adequado depende das condições operacionais e de implantação do sistema em análise.

Além das equações que regem o regime transitório, BOULOS et al (2005) compararam o método das características tradicional (MOC) com o WCM (Wave Characteristic Method). Este último é baseado no modelo lagrangiano e já fora estudado na década de 1970 por Wood, que o considerou um método de solução dos problemas de transitórios hidráulicos muito eficaz, mostrando-se rápido e confiável, podendo ser utilizado também quando necessita-se estudar o atrito entre as paredes das tubulações e o fluído transportado.

A partir dos resultados encontrados com a comparação destes dois métodos, MOC e WCM, pôde-se concluir que ambos fornecem resultados similares para os sistemas propostos, podendo ser adotado qualquer um dos métodos para o equacionamento de sistemas hidráulicos em regime transitório, assim como suas condições de contorno.

Dentre os novos estudos, também destaca-se o de STEPHENSON (2002) que considera o reservatório hidropneumático um importante dispositivo de proteção contra os transitórios hidráulicos. Para tanto, apresenta ábacos e equações que facilitam a determinação do tamanho destes dispositivos, assim como os diâmetros das tubulações de entrada e saída.

Segundo STEPHENSON (2002), o diâmetro de entrada do reservatório hidropneumático já fora objeto de estudos anteriores, destacando-se os trabalhos elaborados por este mesmo autor em 1989 que sugere o diâmetro de entrada como sendo 1/10 do diâmetro da tubulação principal, e PARMAKIAN (1963), que sugeriu uma perda de carga na entrada 2,5 vezes maior que a perda de carga da saída. Thorley, em 1991, utilizou os resultados obtidos por Graze e Horlacher para determinar graficamente o diâmetro da tubulação de entrada. Com relação ao diâmetro de saída, o mesmo pode ser estrangulado para reduzir a vazão a jusante do reservatório hidropneumático e com isso mais rapidamente diminuir a coluna de água na tubulação.

Além dos aspectos hidráulicos para o dimensionamento dos reservatórios hidropneumáticos, deve-se estudar os aspectos termodinâmicos, segundo MARTINS (1980), existe uma certa dificuldade na avaliação da transferência de calor, que inclui uma parcela de convecção natural, uma parcela de convecção forçada e uma parcela de calor latente quando a temperatura no interior do reservatório hidropneumático excede as temperaturas de vaporização ou solidificação da água. Tendo em vista essa dificuldade, segundo STEPHENSON (2002), Graze, Schubert e Forrest sugeriram uma análise simplificada considerando somente a transferência de calor através da convecção natural, onde no início do fenômeno, tem-se uma transformação adiabática.

H. R. Graze é tido como um dos grandes estudiosos com relação a estes aspectos termodinâmicos no reservatório hidropneumático, sendo que na década de 1960 ele desenvolveu

uma teoria a respeito deste comportamento termodinâmico, a qual denominou "Rational Heat Transfer (RHT)".

Nela o autor procura compatibilizar o comportamento do ar como gás perfeito (pV/T = cte), com a transferência de calor , a fim de analisar o fenômeno de forma contínua e não mais simplesmente determinar os extremos, isotérmico ou adiabático (GRAZE, 1971).

Após a divulgação desta teoria, assim como depois de apresentar inúmeros artigos relacionados à transferência de calor em reservatórios hidropneumáticos, Graze transformou-se em referência para todos os estudos relacionados a este fenômeno.

GRAZE (1971) comentou o trabalho apresentado por Wood em 1970, complementando este estudo e comentando que, apesar dos estudos envolvendo os reservatórios hidropneumáticos apresentarem aspectos complexos, a análise dos resultados seria bastante beneficiada com a inclusão do processo racional RHT no lugar das formas especificadas da equação politrópica empírica.

GRAZE et al (1976) ainda demonstra que a relação entre a pressão do ar (Pa) e o volume de ar no reservatório hidropneumático (\forall), não pode ser descrita adequadamente pela equação politrópica, $\mathbf{P}_{\mathbf{a}} \cdot \forall^{\mathbf{n}} = \mathbf{constante}$, onde **n**, coeficiente da transformação politrópica, é um valor constante para uma instalação específica.

GIUSEPPE DE MARTINO et al (2002) cita que antes da teoria RHT apresentada por Graze, vários ensaios e pesquisas, como Pistilli em 1957, já apontavam a variação do coeficiente politrópico "**n**" durante um regime transitório. No entanto, para propósitos práticos, os autores recomendam a utilização para este coeficiente de valores variando entre 1,30 e 1,35. Na Itália o valor de **n** = **1,41** é bastante utilizado, pois proporciona condições operacionais seguras.

MARTINS (1980) sugere que para os casos em que se deseja conhecer somente os valores extremos de volume e de pressão do fenômeno, como ocorre normalmente em instalações de bombeamento pode-se utilizar:

- n = 1,4 para estabelecer a pressão mínima;
- n = 1,0 para estabelecer o volume máximo;.

MARTINS (1980) ainda descreve que nos ensaios de Graze, a temperatura no interior do reservatório hidropneumático atinge valores inferiores à temperatura de solidificação da água, então, o calor latente não pode ser desprezado, porém o seu estudo é de natureza complexa e o autor não apresentou um equacionamento adequado para esta parcela de calor trocado.

Mais recentemente, GRAZE et al (1996) desenvolveu a análise do comportamento termodinâmico do ar admitido em um reservatório hidropneumático, onde através de esquemas hidráulicos envolvendo admissão de ar nestes dispositivos de proteção, descreveu uma equação racional de transferência de calor, no entanto devido à complexidade do equacionamento, alguns dados de entrada tiveram que ser estimados ou feitas considerações especiais para continuação dos estudos. Os resultados dos ensaios em laboratório indicam que o coeficiente de transferência de calor (n) para estas condições transitórias varia continuamente e em geral a constante, α , associada com este coeficiente, tem um valor mais alto que o encontrado na literatura para condições em regime permanente.

GRAZE et al (1996) cita que por muitos anos a RHT foi utilizada para analisar o comportamento transitório de uma massa de ar admitida, por exemplo em um reservatório hidropneumático. A aplicação da teoria foi prejudicada pela ausência de dados adequados para atravessar a natureza muito complexa da transferência de calor. É óbvio que a magnitude da aceleração/diminuição de velocidade do volume de ar, como também o tempo para transferência de calor para acontecer, desempenhe um papel importante na determinação correta da transferência de calor durante um transitório.

GRAZE et al (1996) através destes estudos do comportamento termodinâmico do ar fornece informações adicionais para a adoção de critérios e parâmetros adequados para a transferência de calor do ar comprimido no reservatório hidropneumático durante um transitório. Embora a adoção do comportamento isotérmico durante a fase de desaceleração e do comportamento adiabático durante a fase de aceleração sejam estimativas razoáveis, conforme demonstram os resultados de laboratório, uma melhor aproximação é conseguida a partir da adoção do conceito de transferência de calor racional, usando um valor para o adimensional α , constante genérica para transferência de calor, de aproximadamente 3,5.

Mesmo diante da complexidade dos estudos envolvendo a transferência de calor em reservatórios hidropneumáticos, Graze recomenda em seus estudos que, com as análises futuras sendo desenvolvidas com o auxílio de computadores, sejam pesquisados dados adicionais para o fenômeno complexo de transferência de calor no reservatório hidropneumático, de maneira a explorar o potencial da equação racional de transferência de calor.

STEPHENSON (2002) sugere que o valor do coeficiente de expansão dos gases (adimensional) "**n**" varie entre 1,0 (isotérmico) e 1,4 (adiabático), como uma primeira aproximação. Em seus estudos, foram assumidas condições isotérmicas, no entanto estes resultados não podem ser precisos para a determinação do valor de "**n**".

STEPHENSON (2002) efetuou simulações variando os valores de "**n**" e também das perdas de carga na entrada/saída do reservatório hidropneumático, concluindo que, para as análises em regime transitório, estas perdas de carga têm maior representatividade nos resultados do que a variação do valor do coeficiente de expansão dos gases "**n**". Assim sendo, com base nos estudos elaborados por STEPHENSON (2002) e pelos demais pesquisadores citados anteriormente, adotar-se-á na presente pesquisa o valor fixo de 1,2 para o coeficiente "**n**".
4. MODELAGEM MATEMÁTICA

Para o desenvolvimento da pesquisa, descreve-se na seqüência as equações que regem os transitórios hidráulicos, assim como o equacionamento para reservatórios, válvulas e reservatórios hidropneumáticos.

Também é descrito o conceito e as premissas utilizadas nas simulações hidráulicas utilizando-se o modelo computacional para cálculo de condutos forçados em regime transitório, denominado TRANREDE.

4.1. Equacionamento Geral

Na análise de regimes transitórios é tradicional a abordagem dinâmica elástica. O caráter geral de suas equações permite também a análise de escoamentos em regime permanente e oscilatório. Entende-se por regime permanente na análise de escoamentos em condutos forçados, as condições de escoamento em que os valores médios das grandezas G, associadas a pontos fixos neste escoamento, não variam no tempo, observando que a escala de tempo adotada seja bem superior à das flutuações turbulentas destas grandezas.

O regime será dito variável, se as grandezas associadas ao ponto variarem no tempo. Se o regime variável é situação intermediária de ajuste entre um regime permanente inicial e uma nova situação de regime permanente, este regime variável será dito transitório. Por outro lado, caso um regime permanente final não seja estabelecido, e as grandezas apresentem valores oscilando com características periódicas, diz-se que o regime variável é oscilatório (LUVIZOTTO JR, 1995).

Duas equações básicas de mecânica são aplicadas a um curto trecho de fluido num conduto, para a obtenção das equações diferenciais do movimento transitório: a equação da quantidade de movimento e a equação da continuidade. As variáveis dependentes são a elevação da linha piezométrica, H, acima de um plano de referência fixo, e a velocidade média v numa seção transversal. As variáveis independentes são a distância x medida ao longo do conduto desde a extremidade de montante, e o tempo t, sendo assim, H = H (x,t) e v = v (x,t) (STREETER, 1977).

Para a análise dos transitórios hidráulicos deve-se resolver simultaneamente as equações da continuidade (4.1) e da quantidade da quantidade de movimento (4.2).

Em seguida são apresentadas as equações fundamentais que descrevem o fenômeno transitório segundo CHAUDHRY (1979):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \qquad (\text{equação da continuidade}) \qquad (4.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (\text{equação da quantidade de movimento})$$
(4.2)

Onde *H* representa a carga piezométrica instantânea, t é o instante de tempo, a é a celeridade de propagação da onda de pressão, g é a aceleração da gravidade, *A* corresponde a área da seção transversal da tubulação, Q é a vazão no instante de cálculo atual, x é a distância ao longo da tubulação, f é o fator de atrito de Darcy-Weisbach e D corresponde ao diâmetro da tubulação principal.

Estas equações foram deduzidas considerando escoamento unidimensional, no interior de um tubo com seção transversal circular ou prismática, totalmente plena de fluido, possuindo variações suaves de seção transversal e de inclinação do eixo do tubo. São Desprezados os termos convectivos, o que é válido quando as velocidades são pequenas em comparação com a celeridade. Considera-se, ainda, que o atrito pode ser calculado utilizando o equacionamento para regime permanente.

Na equação da continuidade (4.1), um dos elementos constituintes é a celeridade de propagação da onda de pressão "*a*", que é função das características elásticas tanto do fluido quanto da tubulação, podendo ser representada pela equação de Korteweg (ALMEIDA e KOELLE, 1992):

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho \cdot \left(1 + \frac{K}{E} \frac{D}{e}\right)}}$$
(4.3)

Onde *K* representa o módulo de elasticidade volumétrica do líquido, ρ é a massa específica do líquido, *E* corresponde ao módulo de elasticidade do material da tubulação principal, *e* é a espessura desta tubulação e *D* o seu diâmetro.

Essas equações formam um sistema de equações diferenciais parciais do tipo hiperbólico, não integráveis analiticamente, contudo, diversos métodos gráficos, analíticos e numéricos foram desenvolvidos para se chegar a uma solução aproximada.

Atualmente, os métodos numéricos são os mais utilizados para analisar os transitórios hidráulicos. Tais métodos substituíram os métodos algébricos e gráficos, que devido a sua menor aproximação foram perdendo espaço e uso. Dos vários métodos numéricos atualmente utilizados destacam-se: o Método das Características, Método das Diferenças Finitas, Método dos Elementos Finitos, Método Espectral e o Método dos Elementos de Contorno.

Os modelos computacionais possuem a vantagem de permitir a análise de sistemas complexos de engenharia hidráulica, com maior precisão e um menor intervalo de tempo. Assim, é possível utilizar um maior número de seções de integração, obtendo, conseqüentemente, um aumento de precisão no cálculo do transitório.

4.2. Método das Características

Dentre os diversos métodos, o método das características tornou-se popular e extensivamente usado. Para a solução de problemas transitórios unidimensionais, o método vem mostrando ser superior aos outros métodos em muitos aspectos. Segundo CHAUDHRY (1979), o método simula corretamente a propagação de ondas, é eficiente e de fácil programação. Além disso, as condições de contorno podem ser as mais diversas. Outro aspecto relevante é que, para sistemas de abastecimento de água, segundo a norma NBR 12.215 para "Projeto de Adutora de Água para Abastecimento Público" da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), "o estudo do golpe de ariete deve ser feito pelo método das características".

Deste modo, na presente pesquisa, será utilizado o método das características, sendo descrito na seqüência seu equacionamento.

Gerando um sistema com as equações 4.1 e 4.2, atentando para o conceito de derivada total e combinando-as na forma da equação 4.4, pode-se obter as derivadas totais de carga e vazão.

$$L = \lambda . Ll + L2 \tag{4.4}$$

Onde λ é um coeficiente que deverá ser determinado, e L1 e L2 são respectivamente:

$$L1 = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$
(4.5)

$$L2 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0$$
(4.6)

Resultando em:

$$\lambda \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{gA}{\lambda} \cdot \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\lambda a^2}{gA} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x}\right) + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0$$
(4.7)

De onde se observa que os termos entre parênteses representam derivadas totais, desde que os termos multiplicadores das derivadas parciais em x sejam velocidade de transporte, ou seja:

$$\frac{gA}{\lambda} = \frac{\lambda a^2}{gA} = v = \frac{dx}{dt}$$
(4.8)

O que implica na relação:

$$\lambda^2 = \left(\frac{gA}{a}\right)^2 \Longrightarrow \lambda = \pm \frac{gA}{a}$$
(4.9)

Ou seja:

$$v = \frac{dx}{dt} = \pm a \tag{4.10}$$

na qual indica a existência de duas velocidades de transporte, que satisfazem a equação 4.7, gerando dois novos conjuntos de equações válidos aos pares:

$$C^{+} \begin{cases} \frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA} \cdot \frac{dQ}{dt} + \frac{4}{D} \cdot \frac{\tau}{\rho} \cdot \frac{a}{g} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = a \end{cases}$$
(4.11)

$$C^{-} \begin{cases} -\frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA} \cdot \frac{dQ}{dt} + \frac{4}{D} \cdot \frac{\tau}{\rho} \cdot \frac{a}{g} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = -a \end{cases}$$
(4.12)

Ao se transformar as equações diferenciais parciais do tipo hiperbólico em equações de derivadas totais, a avaliação da evolução das cargas e vazões ao longo da tubulação e ao longo do tempo serão válidas sobre uma malha adequadamente discretizada no plano x,t, conforme mostra a **figura 7**.



Figura 7. Malha retangular para a resolução das equações características

Ao conjunto de pontos discretizados no plano (x,t) nos quais a solução numérica será obtida, a partir da condição inicial, de forma progressiva para os instantes seguintes é denominado malha de cálculo. Através da sua aplicação pode-se obter resultados para as variáveis H e Q em cada instante.

Através dessa figura pode-se observar um exemplo de malha regular onde é possível calcular as variáveis H_P (carga) e Q_P (vazão), em um ponto genérico P, no instante $t + \Delta t$, a partir dos valores conhecidos dos pontos A e B no instante anterior t, utilizando as equações 4.11 e 4.12 válidas ao longo das retas características C⁺ e C⁻.

Caracterizando a forma clássica de análise do fenômeno transitório em condutos forçados, observa-se que a parcela de atrito é constituída por um valor de $f(\tau = \tau_{WS})$, onde τ_{WS} representa a tensão de atrito válida para o regime permanente, obtida em temos das condições de regime permanente e, portanto tratando-se de uma simplificação da condição real.

Adotando:

$$\frac{\tau_{ws}}{\rho} = \frac{fV|V|}{8} = \frac{fQ|Q|}{8A^2}$$
(4.13)

e substituindo-se no conjunto de equações 4.11 e 4.12, obtém-se:

$$C^{+} \begin{cases} \frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA} \cdot \frac{dQ}{dt} + \frac{fQ|Q|}{2gDA^{2}} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = a \end{cases}$$
(4.14)

$$C^{-} \begin{cases} -\frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA} \cdot \frac{dQ}{dt} + \frac{fQ|Q|}{2gDA^{2}} = 0\\ \frac{dx}{dt} = -a \end{cases}$$
(4.15)

A integração das equações 4.14 e 4.15 é realizada utilizando a malha regular, sobre a reta característica (C⁺) passando pelos pontos $A \in P$ e sobre a reta característica (C⁻) passando pelos pontos $B \in P$, da **figura 7**.

Equações que regem a reta característica positiva:

$$C_A = H_A + BQ_A \tag{4.16}$$

$$B_A = B + R |Q_A| \tag{4.17}$$

$$H_P = C_A + B_A Q_P \tag{4.18}$$

Equações que regem a reta característica negativa:

$$C_B = H_B - BQ_B \tag{4.19}$$

$$B_B = B + R |Q_B| \tag{4.20}$$

$$H_P = C_B - B_B Q_P \tag{4.21}$$

Através da equação 4.22 pode-se calcular a vazão no ponto P.

$$Q_P = \frac{C_B - C_A}{B_A + B_B} \tag{4.22}$$

Onde:

$$B = \frac{a}{gA}$$
(4.23)

$$R = \frac{f}{2gDA^2}$$
(4.24)

4.3. Equação Geral dos Nós

Segundo ALMEIDA e KOELLE (1992), em uma rede de abastecimento diversos tubos podem estar conectados a um nó em comum. Um nó genérico é representado na **figura 8**, onde Nc é o número de tubos que "convergem" em direção ao nó e Ns é o número de tubos que "saem" (ou "divergem") do nó, de acordo com o sinal de cada tubo. Uma demanda específica D(t) pode ser considerada no nó. Um elemento não-tubo também pode ser associado ao nó.



Figura 8. Representação do nó (ALMEIDA e KOELLE, 1992)

Na seqüência é mostrado o equacionamento geral dos nós, a partir da teoria apresentada por ALMEIDA e KOELLE (1992). Aplicando a equação da continuidade a um nó e utilizando a equação da curva característica C^+ para os tubos que convergem para o nó e a equação das curvas características C^- para os tubos que divergem do nó obtém-se:

$$Q_{PE} = E_N - B_N \cdot H_N \tag{4.25}$$

Onde a equação 4.25 é chamada a equação dos nós, sendo:

$$E_N = \sum_{i=1}^{N_c} \frac{C_{Ai}}{B_{Ai}} + \sum_{j=1}^{N_s} \frac{C_{Bj}}{B_{Bj}} - D(t)$$
(4.26)

$$B_N = \sum_{i=1}^{N_C} \frac{1}{B_{Ai}} + \sum_{j=1}^{N_S} \frac{1}{B_{Bj}}$$
(4.27)

4.4. Equação dos Elementos Não-tubo

Qualquer estrutura hidráulica ou elemento similar por ser considerado como um elemento não-tubo entre dois nós. Cada um destes nós será interligado por um ou mais elementos tubos. Genericamente designa-se os nós como nó 1 e nó 2, assim como a vazão e a carga associadas a estes nós, assim também levando o sufixo 1 e 2 (ALMEIDA e KOELLE, 1992).

Aplicando a equação 4.25 aos nós 1 e 2 obtém-se respectivamente as equações 4.28 e 4.29:

$$H_{N_1} = \frac{E_{N_1}}{B_{N_1}} - \frac{Q_{PE}}{B_{N_1}}$$
(4.28)

$$H_{N_2} = \frac{E_{N_2}}{B_{N_2}} + \frac{Q_{PE}}{B_{N_2}}$$
(4.29)

Muitos dos elementos não-tubos são modelados como elementos de parâmetros concentrados ou um elemento inelástico (incompressível): a vazão Q_{PE} saindo do nó 1 será sempre igual, em módulo, a vazão Q_{PE} entrando no nó 2. A diferença de carga entre os nós 1 e 2 pode então ser obtida a partir da seguinte equação:

$$f(Q_E) = H_{N_1} - H_{N_1} = E_E - B_E \cdot Q_E$$
(4.30)

com H_{N1} , H_{N2} igual a carga nos nós 1 e 2, respectivamente:

$$E_E = \frac{E_{N_1}}{B_{N_1}} - \frac{E_{N_2}}{B_{N_2}}$$
(4.31)

$$B_E = \frac{1}{B_{N_1}} + \frac{1}{B_{N_2}}$$
(4.32)

A equação 4.30 é a equação de compatibilidade do elemento não tubo (ALMEIDA e KOELLE, 1992) e os parâmetros E_E e B_E caracterizam as condições dinâmicas nos dois nós.

Na sequência são apresentados os outros elementos não-tubos considerados nesta pesquisa e integrantes do equacionamento a ser proposto.

4.4.1. Reservatório

No caso dos reservatórios seria necessário apenas um nó de ligação, entretanto, para a manter a consistência com os outros elementos, são utilizados dois nós como mostrado na **figura** 9, sendo H_{N1} a carga no nó 1 e H_{N2} a carga no nó 2. No reservatório as cargas são conhecidas, tendo-se, portanto:



$$H_{N1} = H_R \tag{4.33}$$

$$H_{N2} = H_R \tag{4.34}$$

4.4.2. Válvula

Na condição de regime permanente, a relação entre a vazão e a perda de carga na válvula pode ser dada por:

$$Q_{o0}^{2} = (C_{D} \cdot A)_{0}^{2} \cdot 2g |\Delta H_{0}|$$
(4.35)

Onde: $\Delta H_0 = H_{N_1} - H_{N_2}$, variação de carga no regime permanente (4.36)

Q₀, vazão no regime permanente.

Para um instante qualquer, tem-se, analogamente:

$$Q[Q] = (C_D \cdot A)^2 \cdot 2g\Delta H$$
(4.37)

Onde:
$$\Delta H = H_{N_1} - H_2$$
 (4.38)

 $(C_{D}A)$, produto do coeficiente de descarga pela área num instante qualquer.

Na equação acima foi necessário utilizar Q em módulo para preservar a correta variação do sinal de Q com o de Δ H. Dividindo a equação 4.37 pela 4.35 obtém-se:

$$\frac{Q|Q|}{Q_0^2} = \eta^2 \cdot \frac{\Delta H}{|\Delta H_0|}$$
(4.39)

Onde:
$$\eta = \frac{(C_D A)}{(C_D A)_0}$$
 (4.40)

Substituindo a equação 4.39 na 4.30 obtém-se:

$$Q_E |Q_E| + F \cdot Q_E + G = 0 \tag{4.41}$$

nde:
$$F = \frac{B_E \cdot \eta^2 \cdot Q_0^2}{|\Delta H_0|}$$
(4.42)

On

e

$$G = \frac{-E_E \cdot \eta^2 \cdot Q_0^2}{\left|\Delta H_0\right|}$$
(4.43)

De acordo com ALMEIDA E KOELLE (1992), a equação 4.41 tem a seguinte solução:

$$Q_E = \frac{-2G}{F + \sqrt{F^2 + 4|G|}}$$
(4.44)

4.4.3. Reservatório Hidropneumático

O reservatório hidropneumático é interligado à tubulação principal através de uma inércia concentrada e uma conexão TÊ, dividindo o tubo em dois trechos, um a montante e outro a jusante deste dispositivo, conforme mostra a **figura 10**.



Figura 10. Instalação de um Reservatório Hidropneumático.

A compressibilidade do líquido no interior do reservatório hidropneumático é desprezível face à compressibilidade do ar e desprezam-se o atrito e a inércia. Supõe-se também que o ar sofre uma transformação politrópica, ou seja:

$$P_a \cdot \forall^n = constante$$
 (4.45)

A equação 4.45 é válida para um processo em temperatura constante (onde n=1) ou adiabático (onde n=Cp/Cv, sendo Cp e Cv os calores específicos à pressão e temperatura constante respectivamente).

Como a inércia do liquido é desprezada, a pressão absoluta do ar no interior do reservatório pode ser relacionada com a carga no nó base de acordo com a hidrostática:

$$P_{a} = (H_{BR_{1}} - z_{R} - z_{N_{1}}) \cdot \gamma - p_{atm}$$
(4.46)

Onde Pa é a pressão do ar no reservatório hidropneumático; z_R é a cota no reservatório hidropneumático entre o ponto médio do nível de ar e o eixo da tubulação principal, z_N é a cota no nó de junção do reservatório hidropneumático com o eixo da tubulação principal, H_{BR} é a carga na base do reservatório hidropneumático, p_{atm} é a pressão atmosférica e γ é o peso específico do líquido.

Para o escoamento entrando no reservatório hidropneumático, tem-se a seguinte equação para as perdas de carga:

$$\Delta H = H_{N_1} - H_{BR} = k_e \frac{v^2}{2g} = k_e \frac{Q_{PE}^2}{2gA^2}$$
(4.47)

Substituindo a equação 4.47 na 4.46, tem-se:

$$P_{a} = \left(H_{N_{11}} - k_{e} \frac{Q_{PE}^{2}}{2gA^{2}} - z_{R} - z_{N_{1}}\right) \cdot \gamma - p_{atm}$$
(4.48)

Para o escoamento saindo do reservatório hidropneumático, tem-se a seguinte equação para as perdas de carga:

$$\Delta H = H_{BR} - H_{N_1} = k_s \frac{v^2}{2g} = k_s \frac{Q_{PE}^2}{2gA^2}$$
(4.49)

Substituindo a equação 4.49 na 4.48, tem-se:

$$P_{a} = \left(H_{N_{11}} + k_{e} \frac{Q_{PE}^{2}}{2gA^{2}} - z_{R} - z_{N_{1}}\right) \cdot \gamma - p_{atm}$$
(4.50)

Sendo k_e , o coeficiente de perda de carga na tubulação de entrada do reservatório hidropneumático, e k_s , coeficiente de perda de carga na tubulação de saída do reservatório hidropneumático.

O volume de gás no interior do reservatório pode ser calculado a através da equação:

$$\forall = \forall_0 + \Delta \forall \tag{4.51}$$

Onde \forall é volume de ar instantâneo no reservatório hidropneumático, \forall_0 é o volume de ar no instante anterior e $\Delta \forall$ é a variação do volume de ar.

Como o líquido pode ser considerado incompressível, a variação do volume ocupado pelo gás é devida à entrada de líquido no interior do reservatório ou seja:

$$\Delta \forall = \frac{-(Q_{PE} + Q_E)}{2} \cdot \Delta t \tag{4.52}$$

Onde Q_{PE} é a vazão do reservatório hidropneumático no instante anterior, Q_E é a vazão no instante anterior e Δt é o intervalo de tempo.

Substituindo as equações (4.46), (4.51) e (4.52) na equação de compatibilidade do elemento não tubo, (4.30) obtém-se:

$$\left[\left(H_{N}-z_{R}-z_{N_{1}}\right)\cdot\gamma+p_{atm}\right]\cdot\left[\forall_{0}-\frac{\left(Q_{PE}+Q_{E}\right)}{2}\cdot\varDelta t\right]^{n}-constante=0$$
(4.53)

Onde, para $Q_{PE} \ge 0$, tem-se:

$$\left[\left(H_N - k_e \frac{Q_{PE}^2}{2gA^2} - z_R - z_{N_1} \right) \cdot \gamma + p_{atm} \right] \cdot \left[\forall_0 - \frac{(Q_{PE} + Q_E)}{2} \cdot \Delta t \right]^n - cons \tan te = 0 \quad \textbf{(4.54)}$$

E, para $Q_{PE} < 0$, tem-se:

$$\left[\left(H_N + k_e \frac{Q_{PE}^2}{2gA^2} - z_R - z_{N_1} \right) \cdot \gamma + p_{atm} \right] \cdot \left[\forall_0 - \frac{(Q_{PE} + Q_E)}{2} \cdot \Delta t \right]^n - cons \tan te = 0 \quad (4.55)$$

Para obter a vazão Q_{PE} é necessário solucionar as equações não-lineares 4.54 e 4.55, onde CHAUDHRY (1987) e WYLIE E STREETER (1993) sugerem o método de Newton-Raphson como o mais adequado para a solução do sistema de equações, no entanto, este método necessita que seja avaliada a derivada da função f. Uma alternativa menos trabalhosa é a utilização do método da secante em que as derivadas são avaliadas numericamente, ou seja:

$$f' = \frac{f(Q_{PE_n}) - f(Q_{PE_{n-1}})}{Q_{PE_n} - Q_{PE_{n-1}}}$$
(4.56)

Assim sendo, este será o método utilizado neste trabalho.

4.5. Simulações Matemáticas com o Auxílio de Ferramenta Computacional

No capítulo 3, foram citados alguns trabalhos de pesquisadores que publicaram tabelas, ábacos e gráficos para cálculos de transitórios hidráulicos, assim como para o dimensionamento dos dispositivos de proteção.

Com o advento do computador, foram sendo criados algoritmos e programas derivados de pesquisas nas universidades, utilizando-se diversas linguagens, para a solução dos problemas envolvendo transitórios hidráulicos.

A partir destas pesquisas, empresas no mundo todo foram incentivando o desenvolvimento de "softwares" específicos para o cálculo de transitórios hidráulicos, tais como **CTRAN[®]** da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH), **HI TRANSTM** da ISTEC Ingenieria, **HAMMERTM** da Haestad Methods Inc e **DYAGATSTM** do Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos da Universidad Politécnica de Valencia.

Seguindo essa tendência e procurando deixar a disposição da universidade um programa de cálculo de transitórios hidráulicos aberto para modificações, a presente pesquisa prestou auxílio ao Prof. Dr. Paulo Vatavuk no desenvolvimento do modelo computacional TRANREDE, escrito em linguagem C, contemplando todos os elementos e equacionamentos apresentados anteriormente.

Este programa realiza o cálculo de transitórios hidráulicos, baseando-se nas equações descritas nos itens 4.1 e 4.2 da presente dissertação, ou seja, com base no modelo elástico, tendo o Método das Características como solução para as equações fundamentais que descrevem o fenômeno transitório. Também estão inseridas no programa as equações apresentadas nos itens 4.3 e 4.4, contendo o equacionamento para os nós, tubos, reservatórios, válvulas e o reservatório hidropneumático como dispositivo de proteção contra os transitórios hidráulicos. Outros elementos, como bombas, ventosas, tanques unidirecionais e chaminés de equilíbrio, já têm seu equacionamento descrito no programa, no entanto, tais elementos, deverão compor pesquisas futuras, sendo mais bem estudados e validados assim como faz-se com o reservatório hidropneumático na presente pesquisa.

A maior contribuição da presente pesquisa com relação a este programa refere-se à validação do equacionamento descrito, tanto para os cálculos de transitórios hidráulicos como do reservatório hidropneumático.

A eficiência e confiabilidade do modelo criado foram testadas com simulações efetuadas primeiro neste programa e depois no "software" de mercado **HITRANS™**, da ISTEC Ingenieria. Também foram verificados com este modelo alguns resultados apresentados por PARMAKIAN (1963). Estas verificações são apresentadas na seqüência, no capítulo 5.

A listagem do programa TRANREDE é apresentada em CD anexo à esta dissertação.

Para visualizar esta listagem, o usuário pode utilizar o aplicativo "Bloco de Notas" do Windows[®] ou o programa Dev-C++ da empresa americana Bloodshed Software, o qual possui uma cópia gratuita da versão 4.9.9.2 disponível neste mesmo CD, ou também poderá utilizar outra ferramenta de sua preferência para visualização e compilação de dados em linguagem C.

O programa TRANREDE possui uma entrada de dados feita através do arquivo "dados.dat", tendo as seguines variáveis que podem ser modificadas pelo usuário:

- Dados gerais da simulação:
 - Tempo final (s);
 - Aceleração. Gravitacional (m/s²);
 - Tolerância (erro máximo na resolução em regime permanente) para a vazão;
 - Tolerância (erro máximo na resolução em regime permanente) para a carga;
 - Massa específica (kg/m³);
 - Pressão atmosférica (Pa).
- Topologia da rede, constituída pelos:
 - Elementos, como: Reservatório, Tubo, Válvula, Bomba, Chaminé de equilíbrio, Tanque unidirecional, Reservatório hidropneumático e Ventosa;
 - Nós montante e jusante.
- Carga dos Reservatórios (m);
- Dados dos tubos:
 - Comprimento (m);
 - Diâmetro (m);
 - Número dos nós;
 - Celeridade (m/s);
 - Fator atrito de Darcy-Weisbach *f*.
- Dados das Válvulas:
 - $(C_D \cdot A)_0$. Onde C_D é o coeficiente de descarga da válvula e A é a área da seção transversal da tubulação;

- η (eta): adimensional característico da válvula;
- Dados das chamines de equilibrio:
 - Diâmetro (m);
 - Fator k;
 - Cota no nó de implantação da chaminé (m);
- Dados dos tanques unidirecionais
 - Diâmetro (m);
 - Fator k;
 - Cota no nó de implantação do tanque (m);
 - Altura inicicial (m).
- Dados dos reservatórios hidropneumáticos:
 - Diâmetro (m);
 - Cota no nó de implantação do reservatório hidropneumático (m);
 - Altura inicial da água (m)
 - Altura total do reservatório hidropneumático (m);
 - Coeficiente da transformação politrópica;
 - Coeficiente de perda de carga k na entrada do reservatório hidropneumático;
 - Seção da tubulação de entrada do reservatório hidropneumático (m²);
 - Coeficiente de perda de carga k na saída do reservatório hidropneumático;
 - Seção da tubulação de saída do reservatório hidropneumático (m²);
- Dados das ventosas:
 - Cota no nó de implantação da ventosa (m);
 - Cain (m^2) ;
 - Caout (m^2) .
- Demanda dos nós (m³/s).

Todas as alterações neste arquivo de entrada de dados podem ser feitas através do aplicativo bloco de notas do Windows[®].

O programa TRANREDE, após ser executado. Gera os seguintes arquivos de saída de dados:

- Carga_nos.dat: apresenta a carga nos nós em cada instante de tempo de simulação durante o transitório hidráulico, em metros;
- Vazao_tubos.dat apresenta a vazão dos tubos em cada instante de tempo de simulação durante o transitório hidráulico, em m³/s;
- Rhidro"n".dat (onde "n" é o número do elemento que o reservatório na rede): apresenta para cada instante de tempo de simulação dutrante o transitório hidráulico os seguintes valores:
 - z_r cota no reservatório hidropneumático entre o ponto médio do nível de ar e o eixo da tubulação principal, em metros;
 - vol volume de ar no reservatório hidropneumático, em m³;
 - $q_{pe} vazão, em m^3/s;$
 - pressão do ar no reservatório hidropneumático, em Pa.
- Tubo_h.py: apresenta a variação de carga para cada instante de tempo ao longo da tubulação explicitada;
- Tubo_q.py: apresenta a variação de variação para cada instante de tempo ao longo da tubulação explicitada;

Estes dois úlimos arquivos, com extensão ".py" podem ser visualizados com o auxílio de programa visualizador de gráficos, como por exemplo o VISAN da empresa holandesa Science & Technology BV, "software" gratuito, que também tem uma versão, a 2.0.1, disponível no CD anexo a esta dissertação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta a validação do programa TRANREDE, visando mostrar a confiabilidade do modelo desenvolvido.

Obtida a confiabilidade deste modelo computacional, foram efetuadas diversas simulações hidráulicas, resultando em tabelas e gráficos de aplicação para o prédimensionamento de reservatórios hidropneumáticos, com o intuito de facilitar os projetistas na escolha deste dispositivo de proteção e atenuação de transitórios hidráulicos.

5.1. Validação do Programa TRANREDE

Para a validação do programa TRANREDE, foram efetuadas comparações com o "software" de mercado HiTrans e também comparou-se os resultados obtidos por este modelo com os resultados apresentados por PARMAKIAN (1963).

Na sequência são descritos os métodos utilizados para tais comparações, assim como os resultados obtidos.

5.1.1. Validação do TRANREDE utilizando o "software" HiTrans

5.1.1.1. Programa HiTrans

O "software" HiTrans foi desenvolvido pela empresa ISTEC Ingeniería, empresa uruguaia, que desde 1998 trabalha no desenvolvimento de "softwares" voltados à área da engenharia.

Este programa possui uma interface com o usuário bastante amigável, tanto para a inserção de dados, quanto para a obtenção e visualização dos resultados.

O HiTrans efetua simulações de transitório hidráulicos gerados a partir do desligamento de uma bomba ou do o fechamento rápido de uma válvula.

A opção por utilizar este programa, e não outro "software" de mercado, foi devido o fato de este programa ter sido adquirido pela empresa HagaPlan Planejamento e Projetos Ltda, sendo que a mesma cedeu o HiTrans por empréstimo para a realização das simulações necessárias da presente dissertação.

5.1.1.2. Comparações efetuadas

Primeiramente é descrita a topologia proposta para as simulações a serem efetuadas e na seqüência as premissas estabelecidas para os cálculos.

Depois, apresenta-se a comparação dos resultados obtidos nas simulações realizadas pelo HiTrans com o programa TRANREDE, devido ao fechamento rápido de válvula.

Na seqüência, foram feitos testes comparando os resultados obtidos no HiTrans através de simulações da ocorrência de transitórios hidráulicos devido ao desligamento de uma bomba, com os resultados do TRANREDE em simulações dos transitórios hidráulicos decorridos a partir do fechamento rápido de válvula, isto porque o TRANREDE ainda não contempla as simulações de transitórios hidráulicos ocorridos em decorrência do desligamento de uma bomba.

(*i*) Simulações de transitórios hidráulicos ocorridos devido ao fechamento rápido de válvula

a. Topologia do sistema proposto

Para a validação do programa em linguagem C propõe-se uma topologia genérica constituída pelos elementos apresentados na **figura 11**.



Figura 11. Topologia do sistema proposto.

Nota: (num.) → número do elemento

Elementos constituintes da topologia do sistema proposto:

- (1) e (6) Reservatórios;
- (2), (4) e (5) Tubos;
- (3) Válvula de Bloqueio;
- (7) Reservatório Hidropneumático.

Salienta-se que esta topologia também será utilizada nas simulações hidráulicas para obtenção dos resultados, que serão condensados nas tabelas e gráficos de aplicação para o prédimensionamento de reservatórios hidropneumáticos.

b. Premissas para a inserção dos dados no modelo computacional

Foram estabelecidas algumas premissas iniciais para a inserção no modelo computacional para os dados da topologia proposta, conforme descrito na seqüência.

b1. Dados gerais da simulação:

- Tempo final: 720 segundos;
- Aceleração gravitacional: 9,8 m/s²;
- Tolerância p/ vazão: 0,00001. Erro máximo na resolução em regime permanente;
- Tolerância p/ carga: 0,0001. Erro máximo na resolução em regime permanente;
- Massa específica: 998 kg/m³;

• Pressão atmosférica: 101300 Pa

b2. Dados dos reservatórios:

- Carga no reservatório à montante da válvula (elemento 1): 100 m;
- Carga no reservatório à jusante da válvula (elemento 6): 40,33 m;

b3. Dados dos tubos:

- Comprimento dos tubos (2) e (4): 10 m. cada;
- Comprimento do tubo (5): 4.000 m.;
- Número dos nós: 2 (para os tubos 2 e 4) e 400 (para o tubo 5);
- Diâmetro dos tubos: 0,514 m
- Celeridade dos tubos (m/s): 1.127,17, conforme valores da tabela 2;
- Fator de atrito de Darcy-Weisbach (f): 0,0 (tubos 2 e 4) e 0,018 (tubo 5);

No anexo 1 são apresentados os dados das tubulações de ferro dúctil utilizadas como referência nas simulações hidráulicas da presente pesquisa.

b4. Dados da válvula de bloqueio:

- (C_D · A)₀: 0,1 m². Onde C_D é o coeficiente de descarga da válvula e A é a área da seção transversal da tubulação. Como o tempo de fechamento é muito rápido, o valor de (C_D · A)₀ não irá afetar os resultados;
- η (adimensional característico da válvula) no instante inicial: 1,0. Após o fechamento da válvula o valor é 0,0;
- Tempo de fechamento da válvula: 0,00001.

b5. Dados do reservatório hidropneumático:

- Diâmetro: 3 m;
- Cota no nó de implantação do reservatório hidropneumático: 0,0 m;
- Altura inicial da água: 4,05 m;
- Altura total do reservatório hidropneumático: 9,0 m;
- Coeficiente da transformação politrópica: 1,2.

- Perda de carga na tubulação de entrada do reservatório hidropneumático: $k_e = 3,125$, ou seja, $k_e/(2g.A^2) = 4,1356 \text{ s}^2/\text{m}^5$;
- Seção da tubulação de entrada do reservatório hidropneumático: 0,196 m²;
- Perda de carga na tubulação de saída do reservatório hidropneumático: k_s = 1,25, ou seja, k_s /(2g.A²) = 1,6542 s²/m⁵;
- Seção da tubulação de saída do reservatório hidropneumático: 0,196 m²;

Os valores para perda de carga para a saída do reservatório hidropneumático foram calculados conforme as equações (4.47) e (4.49).

Na **tabela 2** também são apresentados os valores das perdas de carga de entrada do reservatório hidropneumático, onde adotou-se o critério citado por PARMAKIAN (1963), ou seja, que a perda de carga na entrada seja 2,5 vezes maior que a perda de carga da saída.

| Diâmetro Nominal | $k_{e}/(2g.A^{2})$ | $k_{\rm s}/(2g.{\rm A}^2)$ |
|------------------|--------------------|----------------------------|
| (mm) | (s^2/m^5) | (s^2/m^5) |
| 80 | 6310,3615 | 2524,1446 |
| 100 | 2584,7241 | 1033,8896 |
| 150 | 510,5628 | 204,2251 |
| 200 | 161,5453 | 64,6181 |
| 250 | 66,1689 | 26,4676 |
| 300 | 31,9102 | 12,7641 |
| 350 | 17,2243 | 6,8897 |
| 400 | 10,0966 | 4,0386 |
| 450 | 6,3032 | 2,5213 |
| 500 | 4,1356 | 1,6542 |
| 600 | 1,9944 | 0,7978 |
| 700 | 1,0765 | 0,4306 |
| 800 | 0,6310 | 0,2524 |
| 900 | 0,3940 | 0,1576 |
| 1000 | 0,2585 | 0,1034 |
| 1500 | 0,0511 | 0,0204 |
| 2000 | 0,0162 | 0,0065 |

Tabela 2. Perdas de carga de entrada e saída do reservatório hidropneumático

Nota: Valores obtidos a partir de $k_e = 2,5.k_s$, sendo $\Sigma k_s = 1,25$ (soma de perdas de carga localizadas das peças na saída do reservatório hidropneumático, conforme o livro Bombas e Instalações de Bombeamento - MACINTYRE, A.J..

c. Resultados obtidos

Na seqüência são apresentados, em forma de gráficos, as comparações entre os resultados obtidos nos programas HiTrans e TRANREDE para as simulações hidráulicas de transitórios hidráulicos devido ao fechamento rápido de válvula.

Os parâmetros analisados foram:

- Variação do nível de água no interior do reservatório hidropneumático ao longo do tempo;
- Variação da vazão do reservatório hidropneumático ao longo do tempo;
- Variação do volume de ar no interior do reservatório hidropneumático ao longo do tempo;
- Variação da pressão do ar no interior do reservatório hidropneumático ao longo do tempo.



Figura 12. Gráfico com os resultados da variação do nível de água no interior do reservatório hidropneumático ao longo do tempo (720 segundos) durante o regime transitório.



Figura 13. Gráfico com os resultados da variação da vazão do reservatório hidropneumático ao longo do tempo durante o regime transitório.



Figura 14. Gráfico com os resultados da variação do volume de ar no interior do reservatório hidropneumático ao longo do tempo durante o regime transitório.



Figura 15. Gráfico com os resultados da variação pressão do ar no interior do reservatório hidropneumático ao longo do tempo durante o regime transitório.

Analisando-se os parâmetros apresentados nos gráficos, tem-se as seguintes diferenças médias, em termos percentuais:

- Variação do nível de água no interior do reservatório hidropneumático ao longo do tempo: 0,05%;
- Variação da vazão do reservatório hidropneumático ao longo do tempo: 4,18%;
- Variação do volume de ar no interior do reservatório hidropneumático ao longo do tempo: 0,18%;
- Variação da pressão do ar no interior do reservatório hidropneumático ao longo do tempo: 0,73%.

Desta forma, verifica-se que os resultados obtidos nas simulações eftuadas no HiTrans e no TRANREDE são similares.

(ii) Simulações de transitórios hidráulicos ocorridos em decorrência do desligamento de uma bomba

Conforme citado anteriormente, o programa TRANREDE, por enquanto, apenas efetua cálculos de transitórios hidráulicos decorrentes do fechamento rápido de válvula. No entanto, é interessante também verificar se ele pode ser utilizado em sistemas onde o transitório hidráulico é ocasionamento pela parada repentina do bombeamento.

Verificou-se ainda no item anterior, que os programas TRANREDE e HiTrans apresentam resultados similares para simulações em regime transitório devido o fechamento rápido de válvula.

Assim sendo, como o programa HiTrans possui também o cálculo dos transitórios hidráulicos ocasionados pela parada repentina do bombeamento, então resolveu-se efetuar as seguintes simulações hidráulicas com este "software":

- Simulação de transitórios hidráulicos ocasionados pelo fechamento rápido de válvula;
- Simulação de transitórios hidráulicos ocasionados pelo desligamento repentino do bombeamento, considerando-se a inércia do conjunto motor-bomba igual a 0;
- Simulação de transitórios hidráulicos ocasionados pelo desligamento repentino do bombeamento, considerando-se a inércia do conjunto motor-bomba igual a 1,73kg.m² (valor sugerido pelo programa, devido as características dos parâmetros de entrada);

A configuração do sistema proposto para esta verificação é a mesma apresentada na **figura 8**.

Premissas para a inserção dos dados no HiTrans

As premissas estabelecidas para a inserção no HiTrans dos dados da topologia proposta estão descritas na seqüência.

Dados comuns às três simulações propostas:

- Tempo final: 20 segundos;
- Aceleração gravitacional: 9,8 m/s²;
- Massa específica: 998 kg/m³;
- Pressão atmosférica: 101300 Pa
- Carga no reservatório à montante da válvula (elemento 1): 200 m;
- Carga no reservatório à jusante da válvula (elemento 6): 150 m;
- Comprimento dos tubos (2) e (4): 10 m. cada;
- Comprimento do tubo (5): 1.000 m.;
- Número dos nós: 2 (tubos 2 e 4) e 101 (tubo 5);
- Diâmetro dos tubos: 0,2092 m
- Celeridade dos tubos (m/s): 1.244,8, conforme valores da tabela 2;
- Fator de atrito de Darcy-Weisbach (f): 0,0 (tubos 2 e 4) e 0,018 (tubo 5);
- Dados do reservatório hidropneumático:

- Diâmetro: 1 m;
- Cota no nó de implantação do reservatório hidropneumático: 0,0 m;
- Altura inicial da água: 2,0 m;
- Altura total do reservatório hidropneumático: 2,0 m;
- Coeficiente da transformação politrópica: 1,2.
- Perda de carga na tubulação de entrada do reservatório hidropneumático: k_e = 3,125, ou seja, k_e /(2g.A²) = 161,545;
- Seção da tubulação de entrada do reservatório hidropneumático: 0,031 m²;
- Perda de carga na tubulação de saída do reservatório hidropneumático: k_s = 1,25, ou seja, k_s /(2g.A²) = 64,618;
- Seção da tubulação de saída do reservatório hidropneumático: 0,031 m²;

Dados específicos para a simulação considerando fechamento rápido de válvula:

- (C_D · A)₀: 0,1 m². Onde C_D é o coeficiente de descarga da válvula e A é a área da seção transversal da tubulação. Como o tempo de fechamento é muito rápido, o valor de (C_D · A)₀ não irá afetar os resultados;
- η (adimensional característico da válvula) no instante inicial: 1,0. Após o fechamento da válvula o valor é 0,0;
- Tempo de fechamento da válvula: 0,00001.

Dados específicos para a simulação considerando desligamento repentino do bombeamento, onde a inércia do conjunto motor-bomba é igual a 0:

- Vazão do conjunto elevatório: 0,110 m³/s;
- Altura manométrica total: 50 m;
- R.P.M. do conjunto elevatório: 1.750;
- Eficiência do motor: 85%;
- Potência da instalação: 90 cv;
- O sistema possui válvula de retenção;
- Nível do poço de sucção: 150 m;

- Instante de tempo em que a bomba é desligada: 0,1 s.
- Momento de inércia do conjunto elevatório: 0,0 kg.m².

Dados específicos para a simulação considerando desligamento repentino do bombeamento, onde a inércia do conjunto motor-bomba é igual a 1,73 kg.m²:

- Vazão do conjunto elevatório: 0,110 m³/s;
- Altura manométrica total: 50 m;
- R.P.M. do conjunto elevatório: 1.750;
- Eficiência do motor: 85%;
- Potência da instalação: 90 cv;
- O sistema possui válvula de retenção;
- Nível do poço de sucção: 150 m;
- Instante de tempo em que a bomba é desligada: 0,1 s.
- Momento de inércia do conjunto elevatório: 1,73 kg.m².

Resultados Obtidos

A partir destes valores, procederam-se as simulações hidráulicas no HiTrans, obtendo-se as envoltórias de pressão, conforme apresentado nas **figuras 16** e **17**, sendo que na **figura 16** são apresentados os resultados das simulações do sistema sem proteção contra os transitórios hidráulicos, enquanto que na **figura 17** tem-se o mesmo sistema, considerando-se a proteção com o reservatório hidropneumático. Ressalta-se que o terreno lançado nestes gráficos é apenas ilustrativo.



Figura 16. Gráfico comparando as simulações com fechamento de válvula e com parada de bomba, utilizando o programa HiTrans, sem proteção contra os transitórios hidráulicos.



Figura 17. Gráfico comparando as simulações com fechamento de válvula e com parada de bomba, utilizando o programa HiTrans, com reservatório hidropneumático.

A vazão que escoa através da bomba tem o efeito de provocar uma pequena atenuacão do transitório hidráulico, conforme mostra o gráfico da **figura 18**. Este efeito é semelhante ao do reservatório hidropneumatico, que atenua os transitorios cedendo água para o sistema, quando ocorre um abaixamento da pressão na linha de descarga. Isto explica porque as cargas são menores quando temos uma bomba ao invés da válvula. Como a vazão que escoa através da bomba é pequena o efeito de atenuação é pequeno também.



Figura 18. Gráfico mostrando a vazão da bomba ao longo do tempo

A partir dos resultados apresentados, verifica-se que para um sistema sem proteção contra os transitórios hidráulicos, o comportamento das pressões é muito diferente quando tem-se o fechamento rápido de válvula em relação a quando ocorre o desligamento repentino do bombeamento.

Em contrapartida, quando é implantado no sistema o reservatório hidropneumático, como dispositivo de proteção contra os transitórios hidráulicos, verifica-se que as pressões no sistema
comportam-se de maneira similar, tanto quando tem-se o fechamento de válvula quanto quando ocorre a parada de bomba.

Verifica-se que a versão atual do programa TRANREDE pode ser utilizada, com alguma cautela, também em sistemas onde tem-se bombeamento. Os resultados sem dispositivo de proteção, considerando-se o fechamento rápido de válvula, apesar do erro envolvido, são mais conservadores que os obtidos com um modelo mais preciso, pois apresentam valores bem mais acentuados nas subpressões e nas sobrepressões. Neste caso, o sistema eventualmente precisará de um dispositivo de proteção. Quando um dispositivo é incorporado ao sistema, efetuando-se uma nova simulação hidráulica, verifica-se que os resultados encontrados em ambas situações, com fechamento rápido de válvula e com parada repentina de bombeamento, mostra que, à jusante do reservatório hidropneumático, o comportamento das pressões é o mesmo.

5.1.2. Comparação com o método gráfico de Parmakian

Neste são comparados os resultados de simulações do TRANREDE com o método gráfico de PARMAKIAN (1963), pois além de ser um método consagrado na literatura, também apresenta resultados já considerando os sistemas protegidos com reservatórios hidropneumático.

Destaca-se que, não será feita análise do sistema em regime transitório sem proteção, pois tal verificação já fora analisada anteriormente, assim sendo, a simulação a ser realizada contemplará a concepção de que o sistema necessita de proteção, adotando para tanto, o reservatório hidropneumático.

Para comparar-se o programa TRANREDE com os ábacos de dimensionamento de reservatório hidropneumático propostos por PARMAKIAN (1963), optou-se por adaptar o exemplo descrito na pág. 141 do livro de PARMAKIAN (1963), onde considerando a instalação de bombeamento apresentada na **figura 19**, pretende-se determinar um reservatório hidropneumático com dimensão tal que a máxima sobrepressão na linha de recalque adjacente a bomba não seja superior a 0,43.H*0 e que a máxima subpressão na metade do trecho de recalque não exceda 0,21.H*0. O autor também definiu que o valor de K, ou seja, a relação entre a perda de carga total em uma impulsão, incluída a perda no orifício do tanque, e a pressão absoluta no

tanque, é de 0,3 e o adimensional característico do reservatório hidropneumático $\frac{2\forall_0 a}{Q_0 L}$ é 21, onde \forall_0 corresponde ao volume de ar em regime permanente no reservatório hidropneumático, *a* é celeridade de propagação da onda de pressão, Q_0 é a vazão em regime permanente e *L* é o comprimento da tubulação.



Figura 19. Topologia do exemplo apresentado por Parmakian.

A **tabela 3** apresenta as características principais do exemplo apresentado por PARMAKIAN (1963).

| Tabela 3. | Características | principais | do | exemplo | apresentado | por | Parmakian, | conforme |
|-----------|-----------------|------------|----|---------|-------------|-----|------------|----------|
| Figura 16 | • | | | | | | | |

| Variáveis do exemplo apresentado por Parmakian | Valores apresentados por Parmakian | Valores no S.I. |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| Q ₀ : vazão em regime permanente | 100 ft ³ /s | 2,8317 m ³ /s |
| A: seção da tubulação de recalque | 19,65 ft ² | 1,8255 m ² |
| V ₀ : velocidade inicial, em regime permanente | 5,09 ft/s | 1,5514 m/s |
| a: celeridade | 2.960 ft/s | 902,208 m/s |
| H [*] ₀ : carga piezométrica absoluta no reservatório | | |
| hidropneumático, em regime permanente | 234 ft | 71,323 m |
| $2\rho^*$: característica da tubulação principal | 2,0 | 2,0 |

Fonte: PARMAKIAN, J. Waterhammer Analysis. Dover Publications, Inc. New York, 1963. Nota: 1 ft = 0,3048 m.

A partir dos dados apresentados na tabela 5 e da configuração do sistema, **figura 19**, o exemplo proposto por PARMAKIAN (1963) é solucionado graficamente da seguinte maneira:

- 1. Lança-se, conforme mostra a **figura 20**, o valor de $\frac{2 \forall_0 a}{Q_0 L} = 21$ e o valor da máxima subpressão na metade do trecho de recalque (H^{*}₀ Máxima subpressão) cruzando com a curva $2\rho^* = 2$;
- 2. Depois prolonga-se a linha de $\frac{2\forall_0 a}{Q_0 L} = 21$ até alcançar a curva $2\rho^* = 2$ da máxima sobrepressão na linha de recalque adjacente a bomba (H^{*}₀ Máxima sobrepressão), encontrando-se o valor de 0,27. Este valor é menor que o estabelecido de 0,43, portanto, atende ao especificado;
- Depois determina-se o valor da máxima subpressão na linha de recalque adjacente a bomba (H^{*}₀ – Máxima subpressão) cruzando com a curva 2ρ^{*}= 2. Este valor segundo o gráfico é de 0,32;
- Assim sendo, atendidas as condições estabelecidas, determina-se o volume inicial de ar comprimido no reservatório hidropneumático em regime permanente, ∀₀.

Como $\frac{2\forall_0 a}{Q_0 L} = 21$, então $\forall_0 = 20,09 \text{ m}^3$;

A partir das equações 5.1 e 5.2, calcula-se o volume mínimo do reservatório hidropneumático (∀²), que é de 316,992 m³;

$$\forall' \approx \frac{\forall_0 H_0^*}{H_{\min}^*}$$
(5.1)

$$H_{min}^* = H_0^*$$
 - (máxima subpressão adjacente à bomba) (5.2)



Figura 20. Solução gráfica para o reservatório hidropneumático, com K=0,3, mostrando os valores descritos no exemplo apresentado por PARMAKIAN (1963)

Onde, no exemplo apresentado, a máxima subpressão adjacente à bomba corresponde ao valor de $\left[H_1 - (0.32H_0^*)\right]$, onde H₁ corresponde a carga na saída da bomba.

A carga piezométrica mínima adjacente à bomba verificada neste exemplo foi de 38,13 m e a máxima foi 91,63 m.

Assim sendo, procedeu-se a adaptação deste exemplo apresentado por PARMAKIAN (1963) para o programa TRANREDE, conforme mostra a **figura 21**.



Figura 21. Topologia do exemplo apresentado por Parmakian, adaptado para o programa TRANREDE.

Foram inseridos no TRANREDE os mesmos valores definidos por PARMAKIAN (1963), considerando-se os seguintes dados para o reservatório hidropneumático:

- Diâmetro: 4,0 m (Seção = $12,566\text{m}^2$);
- Cota no nó de implantação do reservatório hidropneumático: 0,0 m;
- Altura inicial da água: 23,62 m;
- Altura total do reservatório hidropneumático: 25,225 m;
- Coeficiente da transformação politrópica: 1,2;
- Coeficiente de perda de carga k na entrada do reservatório hidropneumático: 0,0001;
- Seção da tubulação de entrada do reservatório hidropneumático: 1,8255 m²;
- Coeficiente de perda de carga k na saída do reservatório hidropneumático: 0,0001;
- Seção da tubulação de saída do reservatório hidropneumático: 1,8255 m²;

Assim sendo tem-se os seguintes valores resultantes da simulação:

• Volume inicial da água: 296,902 m³;

- Volume inicial de ar: 20,09 m³;
- Volume total do reservatório hidropneumático: 316,992 m³;
- A carga piezométrica mínima adjacente a válvula: 31,75 m;
- A carga piezométrica máxima adjacente a válvula: 92,77 m;

Em termos percentuais, a carga piezométrica mínima adjacente a válvula, calculado pelo programa TRANREDE, foi 16,7% menor que o valor calculado por PARMAKIAN (1963). Com relação a carga piezométrica máxima adjacente a válvula calculado noTRANREDE foi de 1,2%.

Estas diferenças justificam-se em função dos parâmetros estabelecidos pelo método gráfico de cálculo, proposto por PARMAKIAN (1963), que tem por finalidade a proteção de sistema de recalque, em compensação, o TRANREDE simula apenas o fechamento rápido de válvula. Outro aspecto importante são os erros acumulados em função da adaptação de dados deste método gráfico para o programa TRANREDE.

5.2. Resultados do Programa TRANREDE para o Pré-dimensionamento de Reservatórios Hidropneumáticos

Este item apresenta as simulações hidráulicas efetuadas com o programa TRANREDE, resultando na determinação de tabelas e gráficos aplicativos para o prédimensionamento de reservatórios hidropneumáticos, com o intuito de facilitar os projetistas na escolha deste dispositivo de proteção e atenuação de transitórios hidráulicos.

Inicialmente descreve-se como foi procedido a inserção de dados no TRANREDE. A seguir, tem-se a sequência aplicada para as simulações hidráulicas e obteção de resultados.

Para elucidar a forma de utilização das tabelas e gráficos de pré-dimensionamento para reservatórios hidropneumáticos definidos na presente pesquisa, apresenta-se no item 5.2.4 dois exemplos de aplicação.

5.2.1. Dados empregados na simulação com o modelo

Obtida a confiabilidade do TRANREDE, a partir das simulações apresentadas anteriormente, iniciou-se o processo de simulações hidráulicas, objetivando obter as tabelas e os gráficos de aplicação para o pré-dimensionamento de reservatórios hidropneumáticos.

A topologia do sistema proposto, para a obtenção dos resultados, é genérica e constituída pelos elementos apresentados na **figura 11.**

O universo de situações simuladas para determinação do pré-dimensionamento dos reservatórios hidropneumáticos foi o seguinte:

- Diâmetro nominal da tubulação principal: variando de 80mm a 2.000mm;
- Diferença de cargas no sistema modelado: variando de 10m a 200m;
- Extensão da tubulação principal, à jusante do reservatório hidropneumático: variando de 50 m a 10.000m.

Também foram considerados os seguintes parâmetros como dados de entrada para o sistema estudado:

Dados gerais da simulação:

- Tempo final: 20 segundos;
- Aceleração gravitacional: 9,8 m/s²;
- Tolerância p/ vazão: 0,00001. Erro máximo na resolução em regime permanente;
- Tolerância p/ carga: 0,0001. Erro máximo na resolução em regime permanente;
- Massa específica: 998 kg/m³;
- Pressão atmosférica: 101300 Pa

Dados dos reservatórios:

- Carga no reservatório à montante da válvula (elemento 1): 200 m;
- Carga no reservatório à jusante da válvula (elemento 6): variando de 190m a 0m;

Dados dos tubos:

- Comprimento dos tubos (2) e (4): 10 m. cada;
- Comprimento do tubo (5) (m): variável para cada simulação;
- Número dos nós: 2, para os tubos 2 e 4, e variável conforme a extensão, para o tubo 5;
- Diâmetro dos tubos (m): variável para cada simulação;
- Celeridade dos tubos (m/s): variável para cada diâmetro, conforme valores da tabela 2;
- Fator de atrito de Darcy-Weisbach (f): 0,0 (tubos 2 e 4) e 0,018 (tubo 5).

Assim como nas simulações de validação do TRANREDE, utilizou-se os tubos de ferro dúctil, cujos dados são apresentados em anexo.

Dados da válvula de bloqueio:

- (C_D · A)₀: 0,1 m². Onde C_D é o coeficiente de descarga da válvula e A é a área da seção transversal da tubulação. Como o tempo de fechamento é muito rápido, o valor de (C_D · A)₀ não irá afetar os resultados;
- η (adimensional característico da válvula) no instante inicial: 1,0. Após o fechamento da válvula o valor é 0,0;
- Tempo de fechamento da válvula: 0,00001.

Dados do reservatório hidropneumático:

- Diâmetro (m): variável para cada simulação;
- Cota no nó de implantação do reservatório hidropneumático: 0,0 m;
- Altura inicial da água (m): variável para cada simulação;
- Altura total do reservatório hidropneumático (m): variável para cada simulação;
- Coeficiente da transformação politrópica: 1,2.
- Perda de carga na tubulação de entrada do reservatório hidropneumático: k_e = 3,125;
- Seção da tubulação de entrada do reservatório hidropneumático (m²): variável para cada diâmetro de entrada;

- Perda de carga na tubulação de saída do reservatório hidropneumático: $k_s = 1,25$;
- Seção da tubulação de saída do reservatório hidropneumático: (m²): variável para cada diâmetro de saída;

5.2.2. Simulações hidráulicas

Verificando-se as condições e resutados de projetos existentes de sistemas implantados com reservatório hidropneumático, emprestados pela empresa HAGAPLAN (2006), adotou-se os seguintes critérios para as simulações hidráulicas do sistema proposto, em regime transitório, tendo o reservatório hidropneumático como dispositivo de proteção:

- 1. O reservatório hidropneumático sempre está instalado junto a válvula de bloqueio;
- 2. Iniciou-se a simulação a partir do diâmetro nominal 300mm, diferença de cargas de 100m e extensão da tubulação principal igual a 2000 m. Isto porque consultou-se um projeto de uma adutora, elaborado pela empresa HAGAPLAN (2006), contendo estas mesmas características e que possui reservatório hidropneumático como dispositivo de proteção contra os transitórios hidráulicos;
- Depois, seguindo as premissas do projeto elaborado pela HAGAPLAN (2006), foram sendo estabalecidas as dimensões dos reservatórios hidropneumático, para cada simulação efetuada, com base na seguinte regra:
 - a. Altura total do reservatório hidropneumático no início da simulação: de 2 a
 3 vezes o diâmetro interno do tanque;
 - b. Volume de ar inicial no reservatório hidropneumático: 55% a 65% do volume interno total;
 - c. Cargas piezométricas máximas no sistema: 20 a 30% de sobrepressão em relação às cargas em regime permanente;
 - d. Cargas piezométricas mínimas no sistema: 50% da carga em regime permanente junto à instalação do reservatório hidropneumático;
 - e. Com o passar das simulações, ajustou-se as características dos reservatórios hidropneumáticos, em função da verificação das cargas piezométricas máximas e mínimas visualizadas;

f. Caso necessário, foi variando-se o diâmetro da tubulação de entrada e saída do reservatório hidropneumático, buscando a redução das perdas e cargas e melhoria nas condições das envoltórias de pressão durante o regime transitório estudado.

Devido o grande número de simulações hidráulicas efetuadas, apresenta-se no CD em anexo, apenas os resultados obtidos em regime transitório, já considerando-se o reservatório hidropneumático no sistema proposto.

Caso o usuário queira verificar a condição em regime transitório do sistema sem este dispositivo de proteção, é disponibilizado o programa TRANREDE e os "softwares" Dev-C++ versão 4.9.9.2 e VISAN versão 2.0.1, possibilitando as simulações pretendidas.

5.2.3. Resultados obtidos

Foram realizadas 1.440 simulações, seguindo-se os critérios estabelecidos anteriormente, resultando nas caraterísticas dos reservatórios hidropneumáticos, conforme apresentado nos apêndices A e B.

No apêndice A são apresentadas 14 tabelas de pré-dimensionamento, classificadas por diâmetro para cada par de valores de extensão da tubulação principal à jusante do reservatório hidropneumático e diferença de cargas, contendo as características principais do reservatório hidropneumático a ser considerado para cada condição estudada.

Na sequência, a **figura 22** mostra um exemplo de apresentação da tabela de prédimensionamento para reservatórios hidropneumáticos.

No apêndice B são apresentados os gráficos resultantes destas simulações hidráulicas, contendo da vazão do sistema em regime permanente em função da extensão a jusante do reservatório hidropneumático, conforme exemplo apresentado na **figura 23**.

| Pré-dimens Tubulação | ionamer Principa | nto de Re I: Diâmet | servatór ro Nomir | io Hidrop nal 200 m | oneumátic m | co | | | | |
|-----------------------------|---------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------|-----|---------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| Carga (m) Ext. (m) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 | |
| 50 | R21 | R21 | | | | | | | | |
| 100 | R21 | R16 | R21 | | | | | | | Locais em que necessita-se a |
| 200 | R5 | R5 | R5 | R16 | R16 | R16 | R21 | | | instalação de outro dispositivo de |
| 400 | R5 | R5 | R5 | R9 | R16 | R16 | R16 | R21 | R31 | reservatório hidropneumático. |
| 500 | R5 | R5 | R5 | R9 | R15 | R16 | R16 | R21 | R31 | |
| 750 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R9 | R16 | R21 | R26 | |
| 1000 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R16 | R21 | |
| 1500 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | Tipo de a ser a | reservató | rio hidrope emplo - R5: | numático |
| 2000 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | -Diâme -Altura | tro do tano total do ta | ue: 1,0m; nque: 2,0m | ; |
| 3000 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | -Volum -Volum | e inicial de .e inicial de | ar: 0,86m³. água: 0,71 | m³. |
| 4000 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | -Nível i eixo da | nicial da ág tubulação | ação | |
| 5000 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | | | | |
| 7500 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | |
| 10000 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | |

Figura 22. Exemplo de apresentação de uma tabela de pré-dimensionamento para reservatórios hidropneumáticos, apresentada no Apêndice A.



Figura 23. Exemplo de apresentação de um gráfico resultante das simulações hidráulicas, em regime transitório, apresentado no Apêndice B.

As variáveis apresentadas como resultados têm a pretensão de facilitar ao máximo o projetista quando da necessidade do pré-dimensionamento de um reservatório hidropneumático de um sistema qualquer.

No entanto, deve-se ressaltar que os resultados apresentados servem de parâmetro para um pré-dimensionamento deste dispositivo de proteção. Para o dimensionamento de um sistema, deve-se proceder uma análise completa em regime permanente e transitório, podendo utilizar os conceitos de transitórios hidráulicos apresentados na presente dissertação e simulando o regime transitório no programa TRANREDE, mas verificando-se sempre todas as variáveis componentes do sistema, assim como suas condições de contorno.

5.2.4. Exemplos de aplicação

5.2.4.1. Exemplo 1

O sistema de adução de água, mostrado na **figura 24**, possui uma bomba efetuando o recalque do reservatório 1 para o 2, e ocorre um transitório hidráulico devido o desligamento repentino do conjunto elevatório. Efetuar o pré-dimensionamento de um reservatório hidropneumático, como dispositivo de proteção para atenuar os efeitos dos transitórios ocorridos.

O sistema tem as seguintes características principais:

- Carga no reservatório 1 (H_{R1}): 10m;
- Carga no reservatório 2 (H_{R2}): 20m;
- Cota de implantação da bomba (z_B): 0 m;
- Altura manométrica da bomba (AMT): 50 m;
- Material da adutora: ferro dúctil;
- Diâmetro nominal da adutora: 600 mm;
- Comprimento total da adutora de recalque: 2.000 m.

Determinar também, qual a vazão em regime permanente para este sistema apresentado.



Figura 24. Topologia do exemplo 1.

A partir dos dados apresentados, verifica-se que a diferença de carga (H0) entre a bomba e o reservatório 2 é de 40 m, pois:

$$H_0 = H_{R1} - z_B + AMT - H_{R2}$$
(5.3)

Consultando-se a tabela A9, Apêndice A, que apresenta o pré-dimensionamento para tubulações com diâmetro nominal de 600 mm, para extensão igual 2.000 metros e carga igual a 40 m, o reservatório hidropneumático adequado para proteção contra os transitórios hidráulicos deste sistema é o **R2**, tendo as seguintes características principais, conforme definido na tabela A1 e apresentado na **figura 25**, neste mesmo apêndice:

| Tabela A9 Pré-dimens Tubulação | sionamer Principa | nto de Re I: Diâmet | servatór ro Nomir | io Hidrop nal 600 m | neumáti m | co | | | | |
|--------------------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----------------------------------------|
| Carga (m) Ext. (m) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 | |
| 50 | | | | | | | | | | |
| 100 | | | | | | | | | | necessita-se a |
| 200 | | | | | | | | | | dispositivo de proteção associado ao |
| 400 | R13 | R34 | R34 | R34 | R34 | | | | | reservatório hidropneumático. |
| 500 | R13 | R34 | R34 | R34 | R34 | | | | | |
| 750 | R13 | R28 | R34 | R34 | R34 | R34 | | - | | |
| 1000 | R13 | R13 | R28 | R34 | R34 | R34 | R42 | | | |
| 1500 | R13 | R13 | R13 | R28 | R28 | R28 | R33 | | | |
| 2000 | R13 | R13 | R13 | R13 | R13 | R28 | R33 | R42 | | |
| 3000 | R13 | R13 | R13 | R13 | R13 | R28 | R33 | R33 | | |
| 4000 | R13 | R13 | R13 | R13 | R13 | R28 | R33 | R33 | | |
| 5000 | R13 | R13 | R13 | R13 | R13 | R28 | R33 | R33 | | |

Figura 25. Pré-dimensionamento do reservatório hidropneumático do exemplo 1, utilizando-se a tabela A9 do apêndice A.

Reservatório Hidropneumático R13

- Altura total do tanque: 4,0 m;
- Diâmetro interno do tanque: 2,0 m;
- Nível inicial da água em relação eixo da tubulação: 3,1 m;
- Volume inicial da água: 5,65 m³;
- Volume inicial de ar: 6,91 m³;
- Diâmetro da tubulação de entrada do reservatório hidropneumático: 600 mm;
- Diâmetro da tubulação de saída do reservatório hidropneumático: 600 mm;

Para a determinação da vazão em regime permanente, deve-se utilizar o gráfico B8, apresentado no apêndice B, conforme mostra a **figura 26**.



Figura 26. Gráfico B8 do apêndice B, para determinação da vazão em regime permanente para tubulação principal DN 600 mm do exemplo 1.

A partir deste gráfico, obtem-se a vazão em regime permanente para este sistema no valor de 0,970 m^3/s .

5.2.4.2. Exemplo 2

O sistema de adução de água, mostrado na **figura 27**, tem a alimentação do reservatório 2 feita por gravidade pelo reservatório 1, sendo que devido o fechamento rápido da válvula de bloqueio, ocorre um transitório hidráulico neste sistema. Efetuar o prédimensionamento de um reservatório hidropneumático, como dispositivo de proteção para atenuar os efeitos dos transitórios ocorridos.

O sistema tem as seguintes características principais:

- Carga no reservatório 1 (H_{R1}): 55m;
- Carga no reservatório 2 (H_{R2}): 10m
- Cota de implantação da válvula: 0 m
- Material da adutora: ferro dúctil;
- Diâmetro nominal da adutora: 600 mm;

• Comprimento total da adutora de recalque: 1.400 m.

Determinar também, qual a vazão em regime permanente para este sistema apresentado.

A partir dos dados apresentados, verifica-se que a diferença de carga (H_0) entre o reservatório 1 e o reservatório 2 é de 45 m, pois:

 $H_0 = H_{R1} - H_{R2}$ (5.4)



Figura 27. Topologia do exemplo 2.

Consultando-se a tabela A9, Apêndice A, que apresenta o pré-dimensionamento para tubulações com diâmetro nominal de 600 mm, para extensão igual 1.400 metros e carga igual a 45 m, o reservatório hidropneumático adequado para proteção contra os transitórios hidráulicos deste sistema é o **R2**. Isto porque, nesta tabela, não existe este par de valores de extensão e carga, desta maneira, sempre que isso ocorrer, deve-se utilizar os valores subseqüentes, conforme obeserva-se na **figura 28**.

As características principais deste dispositivo, conforme definido na tabela A1 do apêndice A, são as seguintes:

Reservatório Hidropneumático R28

- Altura total do tanque: 9,0 m;
- Diâmetro interno do tanque: 3,0 m;
- Nível inicial da água em relação eixo da tubulação: 5,35 m;
- Volume inicial da água: 28,63 m3;
- Volume inicial de ar: 34,99 m3;
- Diâmetro da tubulação de entrada do reservatório hidropneumático: 600 mm;
- Diâmetro da tubulação de saída do reservatório hidropneumático: 600 mm;

| Γabela A9 Pré-dimens Γubulaç <u>ão</u> | ionamer Princi <u>pa</u> | nto de Re I: Diâm <u>et</u> | servatóri ro Nomir | io Hidrop nal 600 <u>m</u> | neumátio m | co | | | | |
|----------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----------------------------------------|
| Carga (m) Ext. (m) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 | |
| 50 | | | | | | | | | | |
| 100 | | | | | | | | | | Locais em que necessita-se a |
| 200 | | | | | | | | | | dispositivo de proteção associado ao |
| 400 | R13 | R34 | R34 | R34 | R34 | | | | | reservatório hidropneumático. |
| 500 | R13 | R34 | R34 | R34 | R34 | | | | | |
| 750 | R13 | R28 | R34 | R34 | R34 | R34 | | - | | |
| 1000 | R13 | R13 | R28 | R34 | R34 | R34 | R42 | | | |
| 1500 | R13 | R13 | R13 | R28 | R28 | R28 | R33 | | | |
| 2000 | R13 | R13 | R13 | R13 | R13 | R28 | R33 | R42 | | |
| 3000 | R13 | R13 | R13 | R13 | R13 | R28 | R33 | R33 | | |
| 4000 | R13 | R13 | R13 | R13 | R13 | R28 | R33 | R33 | | |
| 5000 | R13 | R13 | R13 | R13 | R13 | R28 | R33 | R33 | | |

Figura 28. Pré-dimensionamento do reservatório hidropneumático do exemplo 2, utilizando-se a tabela A9 do apêndice A.

Para a determinação da vazão em regime permanente, deve-se utilizar o gráfico B8, apresentado no apêndice B, conforme mostra a **figura 29**.



Figura 29. Gráfico B8 do apêndice B, para determinação da vazão em regime permanente para tubulação principal DN 600 mm do exemplo 2.

No caso da análise gráfica, utilizou-se a extensão de 1.400m e interpolando-se as cargas 40m e 50m, determinou-ae a curva da carga de 45m, obtendo-se, desta maneira, a vazão em regime permanente para este sistema de 1,300 m^3/s .

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados apresentados, o programa TRANREDE mostrou-se confiável e pode ser utilizado como ferramenta nos cálculos de transitórios hidráulicos.

Enquanto não forem inseridas condições de contorno relacionadas às bombas, o programa pode ser utilizado, desde que seja considerada a ocorrência de transitório hidráulico devido ao fechamento rápido de válvula. Neste caso, não será considerada a inércia do conjunto motorbomba.

Verifica-se também que os métodos de pré-dimensionamento através de gráficos ou ábacos para determinação dos reservatórios hidropneumáticos são de grande utilidade, podendo auxiliar no cálculo de transitórios hidráulicos e no pré-dimensionamento de reservatórios hidropneumáticos ou de outros dispositivos de proteção. Apesar da facilidade atualmente com os modelos e ferrametnas computacionais, os métodos gráficos em geral têm boa aceitação junto aos projetistas quando da elaboração de pré-dimensionamentos.

As tabelas de aplicação, associadas aos gráficos apresentados no apêndice desta dissertação, resultantes da presente pesquisa, apresentam-se como ferramentas rápidas de prédimensionamento de reservatórios hidropneumáticos. No entanto, o projetista deve utilizar tais valores apenas como referenciais para um pré-dimensionamento da proteção contra os efeitos do transitório hidráulico, pois cada projeto apresenta suas particularidades, tais como topografia, material da tubulação a ser utilizado, características do fluído a ser transportado, entre outras. Ressalta-se ainda, que o estudo de transitórios hidráulicos de um sistema é bastante amplo, devendo ser conduzido por um profissional capacitado e com pleno conhecimento dos equacionamentos do regime transitório, suas condições de contorno, máquinas, equipamentos e dispositivos de proteção, dimensionando, desta forma, um sistema tecnicamente e economicamente viável de ser implantado e operado.

Por fim, nesta dissertação, são feitas as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Estudo mais aprofundado dos métodos de cálculo de transitórios hidráulicos através de gráficos ou ábacos para, buscando dar aos projetistas praticidade e agilidade em pré-dimensionamentos de sistemas hidráulicos que exijam o estudo das condições transitórias. Este estudo teria como objetivo também uma maior disseminação dos métodos existentes, buscando facilitar a leitura e o entendimento dos usuários;
- Atualização do programa TRANREDE, finalizando a inserção dos equacionamentos de bombas e dos demais dispositivos de proteção, efetuando os testes necessários e validando os resultados, buscando a confiabilidade do programa;
- Elaboração de tabelas de aplicação, gráficos e/ou ábacos para o prédimensionamento dos demais dispositvos de proteção contra os efeitos dos transitórios hidráulicos;
- Efetuar comparativo entre os modelos rígido e elástico, verificando a aplicação dos dois modelos, suas diferenças, complexidades e aplicabilidade;
- Estudar sistemas hidráulicos existentes e em operação, onde, com o auxílio do programa TRANREDE, simularia-se os transitórios hidráulicos calculados teoricamente e, a partir de dados de campo obtidos durante uma próxima pesquisa, transformar-se-ia este programa numa ferramenta associada à operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLIEVI, L. Air Chambers for Discharges Pipes. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. HYD 59-7. pp. 651-659, 1937.
- ALMEIDA, A.B. e KOELLE, E. Fluid Transients in Pipe Networks. Computational Mechanic Publications, Elsevier Applied Science, 1992.
- ANGUS, R.W. Air Chambers and Valves in Relation to Water Hammer. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. HYD 59-8. pp. 661-668, 1937.
- BOULOS, P.F., KARNEY, B.W., WOOD, D.J., LINGIREDDY, S. Hydraulis Transient Guidelines for Protecting Water Distribution Systems. Journal AWWA. 97:5, 2005.
- CHAUDHRY, M.H. Applied Hydraulic Transients. 1. ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1979.
- DE MARTINO; G., DE PAOLA, F., FONTANA, N., GIUGNI, M. Discussion of "Simple Guide for Design of Air Vessels for Water Hammer Protection of Pumping Lines". Journal of Hydraulic Engineering, pp. 273 – 275, 2004.
- GRAZE, H.R.. Discussion of "Pressure Surge Attenuation Utilizing an Air Chamber". Journal of the Hydraulic Division. Proceeding of the American Society of Civil Engineers, pp. 455 – 459, 1971.
- GRAZE, H.R., SCHUBERT, J., FORREST, J.A. Analysis of Field Measurement of Air Chamber Installations. 2nd International Conference on Pressure Surges, British Hydromechanics Research Association, 1976.

- GRAZE, H.R., MEGLER, V., HARTMANN, S. Thermodynamic Behaviour of the entrapped air in an air chamber. Pressure Surges and Fluid Transients – BHR Group. Pp. 549 – 560, 1996.
- HAGAPLAN PLANEJAMENTO E PROJETOS LTDA, **Projetos Executivos da Estação Elevatória São Pedro**, São Bernardo do Campo, 2006.
- LEE, T.S. Effects of Air Entrainment on the Ability of Air Vessels in the Pressure Surge Supprections. Journal of Fluids Engineering. Vol. 122. pp. 499 – 504, 2000.
- LUVIZOTTO JR., E. Controle operacional de redes de abastecimento de água auxiliado por computador, Tese apresentada a EPUSP para obtenção do título de Doutor, São Paulo, 1995.
- MACINTYRE, A.J. Bombas e Instalações de Bombeamento. 2ª. edição revisada. Editora LTC
 Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1997.
- MARTINS, R.M. **Reservatório Hidropneumático em Tubulações de Recalque**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP, 1980.
- PARMAKIAN, J. Waterhammer Analysis. Dover Publications, Inc. New York, 1963.
- SAINT-GOBAIN CANALIZAÇÕES, 2008 in : http://www.saint-gobain-canalizacao.com.br, pesquisa realizada em 01/01/2008.
- STEPHENSON, D. Simple Guide for Design of Air Vessels for Water Hammer Protection of Pumping Lines. Journal of Hydraulic Engineering, pp. 792 – 797, 2002.
- STREETER, V.L. Mecânica dos Fulidos. Editora McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1977.
- WYLIE, E.B. e STREETER, V.L. Fluid Transients in Systems. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- WOOD, D.J. Pressure Surge Attenuation Utilizing an Air Chamber. Journal of the Hydraulic Division. Proceeding of the American Society of Civil Engineers, pp. 1143 – 1155, 1970.

APÊNDICE A

Neste apêndice são apresentadas as tabelas contendo as dimensões dos reservatórios hidropneumáticos para as situações estudadas.

Tabela A1

Pré-dimensionamento de Reservatório Hidropneumático Tipos e Características Principais

| | Características Principais | | | | | | | | | | | |
|-------|----------------------------|-----------|------------|--------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--|--|--|--|--|
| Tipos | h (m) | di (m) | NA₀ (m) | Vol₀ (m³) | ∀ ₀ (m³) | DN _e (mm) | DN _s (mm) | | | | | |
| R1 | 1,25 | 0,50 | 1,60 | 0,11 | 0,13 | 80 | 80 | | | | | |
| R2 | 2,00 | 1,00 | 1,94 | 0,71 | 0,86 | 80 | 80 | | | | | |
| R3 | 2,00 | 1,00 | 1,95 | 0,71 | 0,86 | 100 | 100 | | | | | |
| R4 | 2,00 | 1,00 | 1,98 | 0,71 | 0,86 | 150 | 150 | | | | | |
| R5 | 2,00 | 1,00 | 2,00 | 0,71 | 0,86 | 200 | 200 | | | | | |
| R6 | 2,00 | 1,00 | 2,05 | 0,71 | 0,86 | 300 | 300 | | | | | |
| R7 | 3,00 | 1,50 | 2,50 | 2,39 | 2,92 | 300 | 300 | | | | | |
| R8 | 3,00 | 1,50 | 2,55 | 2,39 | 2,92 | 400 | 400 | | | | | |
| R9 | 4,00 | 2,00 | 2,90 | 5,65 | 6,91 | 200 | 200 | | | | | |
| R10 | 4,00 | 2,00 | 2,95 | 5,65 | 6,91 | 300 | 300 | | | | | |
| R11 | 4,00 | 2,00 | 3,00 | 5,65 | 6,91 | 400 | 400 | | | | | |
| R12 | 4,00 | 2,00 | 3,05 | 5,65 | 6,91 | 500 | 500 | | | | | |
| R13 | 4,00 | 2,00 | 3,10 | 5,65 | 6,91 | 600 | 600 | | | | | |
| R14 | 4,00 | 2,00 | 3,15 | 5,65 | 6,91 | 700 | 700 | | | | | |
| R15 | 5,00 | 2,50 | 3,35 | 11,04 | 13,50 | 200 | 200 | | | | | |
| R16 | 5,00 | 2,50 | 3,35 | 11,04 | 13,50 | 250 | 250 | | | | | |
| R17 | 5,00 | 2,50 | 3,45 | 11,04 | 13,50 | 400 | 400 | | | | | |
| R18 | 7,50 | 3,00 | 4,43 | 23,86 | 29,16 | 100 | 100 | | | | | |
| R19 | 7,50 | 3,00 | 4,43 | 23,86 | 29,16 | 150 | 150 | | | | | |
| R20 | 7,50 | 3,00 | 4,48 | 23,86 | 29,16 | 200 | 200 | | | | | |
| R21 | 7,50 | 3,00 | 4,48 | 23,86 | 29,16 | 300 | 300 | | | | | |
| R22 | 7,50 | 3,00 | 4,53 | 23,86 | 29,16 | 350 | 350 | | | | | |
| R23 | 7,50 | 3,00 | 4,58 | 23,86 | 29,16 | 450 | 450 | | | | | |
| R24 | 7,50 | 3,00 | 4,78 | 23,86 | 29,16 | 800 | 800 | | | | | |

Legenda:

- h Altura total do tanque (m)
- di Diâmetro interno do tanque (m)
- NA 0 Nível inicial da água em relação eixo da tubulação (m)
- Vol₀ Volume inicial da água (m³)
- \forall_0 Volume inicial de ar (m³)
- DN_e Diâmetro de entrada (mm)
- DN_s Diâmetro de saída (mm)

Tabela A1

Pré-dimensionamento de Reservatório Hidropneumático Tipos e Características Principais

| | Características Principais | | | | | | | | | | | |
|-------|----------------------------|-----------|------------|--------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--|--|--|--|--|
| Tipos | h (m) | di (m) | NA₀ (m) | Vol₀ (m³) | ∀ ₀ (m³) | DN _e (mm) | DN _s (mm) | | | | | |
| R25 | 7,50 | 3,00 | 4,83 | 23,86 | 29,16 | 900 | 900 | | | | | |
| R26 | 8,75 | 3,50 | 5,04 | 37,88 | 46,30 | 250 | 250 | | | | | |
| R27 | 9,00 | 3,00 | 5,30 | 28,63 | 34,99 | 500 | 500 | | | | | |
| R28 | 9,00 | 3,00 | 5,35 | 28,63 | 34,99 | 600 | 600 | | | | | |
| R29 | 9,00 | 3,00 | 5,40 | 28,63 | 34,99 | 700 | 700 | | | | | |
| R30 | 9,00 | 3,00 | 5,45 | 28,63 | 34,99 | 800 | 800 | | | | | |
| R31 | 10,00 | 4,00 | 5,60 | 56,55 | 69,12 | 250 | 250 | | | | | |
| R32 | 12,00 | 4,00 | 6,60 | 67,86 | 82,94 | 500 | 500 | | | | | |
| R33 | 12,00 | 4,00 | 6,70 | 67,86 | 82,94 | 600 | 600 | | | | | |
| R34 | 12,00 | 4,00 | 6,75 | 67,86 | 82,94 | 700 | 700 | | | | | |
| R35 | 12,00 | 4,00 | 6,80 | 67,86 | 82,94 | 800 | 800 | | | | | |
| R36 | 12,00 | 4,00 | 6,85 | 67,86 | 82,94 | 900 | 900 | | | | | |
| R37 | 12,00 | 4,00 | 6,90 | 67,86 | 82,94 | 1000 | 1000 | | | | | |
| R38 | 12,00 | 4,00 | 7,15 | 67,86 | 82,94 | 1500 | 1500 | | | | | |
| R39 | 12,00 | 4,00 | 7,40 | 67,86 | 82,94 | 2000 | 2000 | | | | | |
| R40 | 14,00 | 4,50 | 7,50 | 100,20 | 122,46 | 500 | 500 | | | | | |
| R41 | 15,00 | 4,00 | 8,00 | 84,82 | 103,67 | 600 | 600 | | | | | |
| R42 | 15,00 | 4,00 | 8,05 | 84,82 | 103,67 | 700 | 700 | | | | | |
| R43 | 15,00 | 4,00 | 8,10 | 84,82 | 103,67 | 800 | 800 | | | | | |
| R44 | 20,00 | 4,50 | 10,50 | 143,14 | 174,95 | 1000 | 1000 | | | | | |
| R45 | 20,00 | 4,50 | 10,75 | 143,14 | 174,95 | 1600 | 1600 | | | | | |
| R46 | 20,00 | 4,50 | 11,00 | 143,14 | 174,95 | 2000 | 2000 | | | | | |
| R47 | 25,00 | 5,00 | 13,25 | 220,89 | 269,98 | 2000 | 2000 | | | | | |
| R48 | 30,00 | 6,00 | 15,50 | 381,70 | 466,53 | 2000 | 2000 | | | | | |

Legenda:

- h Altura total do tanque (m)
- di Diâmetro interno do tanque (m)
- NA 0 Nível inicial da água em relação eixo da tubulação (m)
- Vol₀ Volume inicial da água (m³)
- \forall_0 Volume inicial de ar (m³)
- DN_e Diâmetro de entrada (mm)
- DN_s Diâmetro de saída (mm)

| Tabela A2 Pré-dimensionamento de Reservatório Hidropneumático Tubulação Principal: Diâmetro Nominal 80 mm | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|--|--|
| Carga (m) Ext. (m) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 | | |
| 50 | R2 | | | | | | | | | | |
| 100 | R1 | R2 | R2 | R2 | R2 | | R2 | | | | |
| 200 | R1 | R1 | R2 | R2 | R2 | R2 | R2 | | | | |
| 400 | R1 | R1 | R1 | R1 | R1 | R2 | R2 | R2 | | | |
| 500 | R1 | R1 | R1 | R1 | R1 | R1 | R2 | R2 | R2 | | |
| 750 | R1 | R1 | R2 | | |
| 1000 | R1 | R1 | R2 | | |
| 1500 | R1 | R1 | R2 | | |
| 2000 | R1 | R1 | R2 | | |
| 3000 | R1 | R1 | R2 | | |
| 4000 | R1 | R1 | R1 | | |
| 5000 | R1 | R1 | R1 | | |
| 7500 | R1 | R1 | R1 | | |
| 10000 | R1 | R1 | R1 | | |

| Tabela A3 Pré-dimensionamento de Reservatório Hidropneumático Tubulação Principal: Diâmetro Nominal 100 mm | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|--|--|
| Carga (m) Ext. (m) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 | | |
| 50 | | | | | | | | | | | |
| 100 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | | | | | | |
| 200 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R18 | R18 | R19 | | | |
| 400 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R19 | | | |
| 500 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R19 | | |
| 750 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R19 | | |
| 1000 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R19 | | |
| 1500 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R19 | | |
| 2000 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R19 | | |
| 3000 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R19 | | |
| 4000 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R19 | | |
| 5000 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R18 | | |
| 7500 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R18 | | |
| 10000 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R3 | R18 | | |

| Tabela A4 Pré-dimensionamento de Reservatório Hidropneumático Tubulação Principal: Diâmetro Nominal 150 mm | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|--|--|
| Carga (m) Ext. (m) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 | | |
| 50 | R4 | R4 | R4 | | | | | | | | |
| 100 | R4 | R4 | R4 | R4 | R4 | | | | | | |
| 200 | R4 | R4 | R4 | R4 | R4 | R4 | R20 | R20 | | | |
| 400 | R4 | R20 | | | |
| 500 | R4 | R4 | | | |
| 750 | R4 | R4 | | | |
| 1000 | R4 | R4 | R20 | | |
| 1500 | R4 | R4 | R20 | | |
| 2000 | R4 | R4 | R20 | | |
| 3000 | R4 | R4 | R20 | | |
| 4000 | R4 | R4 | R20 | | |
| 5000 | R4 | R4 | R20 | | |
| 7500 | R4 | R4 | R20 | | |
| 10000 | R4 | R4 | R20 | | |

| Tabela A5 Pré-dimensionamento de Reservatório Hidropneumático Tubulação Principal: Diâmetro Nominal 200 mm | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|
| Carga (m) Ext. (m) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 | | |
| 50 | R21 | R21 | | | | | | | | | |
| 100 | R21 | R16 | R21 | | | | | | | | |
| 200 | R5 | R5 | R5 | R16 | R16 | R16 | R21 | | | | |
| 400 | R5 | R5 | R5 | R9 | R16 | R16 | R16 | R21 | R31 | | |
| 500 | R5 | R5 | R5 | R9 | R15 | R16 | R16 | R21 | R31 | | |
| 750 | R5 | R5 | R5 | R5 | R5 | R9 | R16 | R21 | R26 | | |
| 1000 | R5 | R16 | R21 | | |
| 1500 | R5 | R16 | | |
| 2000 | R5 | R16 | | |
| 3000 | R5 | R16 | | |
| 4000 | R5 | | |
| 5000 | R5 | | |
| 7500 | R5 | | |
| 10000 | R5 | | |

| Tabela A6 | Tabela A6 | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------------|-----------|------------|-----------|--------|----|-----|-----|-----|--|--|--|
| Pré-dimens | sionament | o de Rese | rvatório H | lidropneu | mático | | | | | | | |
| Tubulação | Principal: | Diâmetro | Nominal | 300 mm | | | | | | | | |
| Carga (m) Ext. (m) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 | | | |
| 50 | | | | | | | | | | | | |
| 100 | | | | | | | | | | | | |
| 200 | R22 | | | | | | | | | | | |
| 400 | R10 | R7 | R22 | | | | | | | | | |
| 500 | R7 | R6 | R7 | R22 | | | | | | | | |
| 750 | R6 | R6 | R7 | R21 | R7 | | | | | | | |
| 1000 | R6 | R6 | R6 | R7 | R7 | R7 | | | | | | |
| 1500 | R6 | R6 | R6 | R7 | R7 | R7 | R7 | | | | | |
| 2000 | R6 | R6 | R6 | R7 | R7 | R7 | R7 | R7 | | | | |
| 3000 | R6 | R6 | R6 | R7 | R7 | R7 | R7 | R7 | R7 | | | |
| 4000 | R6 | R6 | R6 | R7 | R7 | R7 | R7 | R7 | R7 | | | |
| 5000 | R6 | R6 | R6 | R7 | R7 | R7 | R7 | R7 | R7 | | | |
| 7500 | R6 | R6 | R6 | R7 | R7 | R7 | R7 | R7 | R7 | | | |
| 10000 | R6 | R6 | R6 | R7 | R7 | R7 | R7 | R7 | R7 | | | |

| Tabela A7 | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|
| Pré-dimensionamento de Reservatório Hidropneumático | | | | | | | | | | | |
| Tubulação Principal: Diametro Nominal 400 mm | | | | | | | | | | | |
| Carga (m) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 | | |
| Ext. (m) | | | | | | | | | | | |
| 50 | | | | | | | | | | | |
| 100 | | | | | | | | | | | |
| 200 | R17 | R23 | | | | | | | | | |
| 400 | R17 | R23 | R23 | | | | | | | | |
| 500 | R11 | R17 | R23 | R32 | R32 | | | | | | |
| 750 | R8 | R17 | R17 | R23 | R23 | R23 | R40 | | | | |
| 1000 | R8 | R17 | R17 | R23 | R23 | R23 | R23 | R40 | | | |
| 1500 | R8 | R8 | R8 | R23 | R23 | R23 | R23 | R32 | | | |
| 2000 | R8 | R8 | R8 | R8 | R8 | R23 | R23 | R32 | R32 | | |
| 3000 | R8 | R8 | R8 | R8 | R8 | R8 | R11 | R23 | R32 | | |
| 4000 | R8 | R8 | R8 | R8 | R8 | R8 | R11 | R23 | R23 | | |
| 5000 | R8 | R8 | R8 | R8 | R8 | R8 | R11 | R11 | R23 | | |
| 7500 | R8 | R8 | R8 | R8 | R8 | R8 | R11 | R11 | R11 | | |
| 10000 | R8 | R11 | R11 | | |

| Tabela A8 Pré-dimensionamento de Reservatório Hidropneumático Tubulação Principal: Diâmetro Nominal 500 mm | | | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| Carga (m) Ext. (m) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 | |
| 50 | R27 | | | | | | | | | |
| 100 | R27 | | | | | | | | | |
| 200 | R12 | R27 | | | | | | | | |
| 400 | R12 | R27 | R27 | R28 | R28 | | | | | |
| 500 | R12 | R12 | R27 | R28 | R28 | R28 | | | | |
| 750 | R12 | R12 | R27 | R28 | R28 | R28 | | | | |
| 1000 | R12 | R12 | R12 | R27 | R28 | R28 | R41 | | | |
| 1500 | R12 | R12 | R12 | R12 | R27 | R28 | R28 | R41 | R41 | |
| 2000 | R12 | R12 | R12 | R12 | R12 | R27 | R28 | R41 | R41 | |
| 3000 | R12 | R12 | R12 | R12 | R12 | R12 | R27 | R41 | R41 | |
| 4000 | R12 | R41 | R41 | |
| 5000 | R12 | R27 | R27 | |
| 7500 | R12 | |
| 10000 | R12 | |

| Tabela A9 | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|
| Pré-dimensionamento de Reservatório Hidropneumático | | | | | | | | | | | |
| Tubulação Principal: Diâmetro Nominal 600 mm | | | | | | | | | | | |
| Carga (m) Ext. (m) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 | | |
| 50 | | | | | | | | | | | |
| 100 | | | | | | | | | | | |
| 200 | | | | | | | | | | | |
| 400 | R13 | R34 | R34 | R34 | R34 | | | | | | |
| 500 | R13 | R34 | R34 | R34 | R34 | | | | | | |
| 750 | R13 | R28 | R34 | R34 | R34 | R34 | | | | | |
| 1000 | R13 | R13 | R28 | R34 | R34 | R34 | R42 | | | | |
| 1500 | R13 | R13 | R13 | R28 | R28 | R28 | R33 | | | | |
| 2000 | R13 | R13 | R13 | R13 | R13 | R28 | R33 | R42 | | | |
| 3000 | R13 | R13 | R13 | R13 | R13 | R28 | R33 | R33 | | | |
| 4000 | R13 | R13 | R13 | R13 | R13 | R28 | R33 | R33 | | | |
| 5000 | R13 | R13 | R13 | R13 | R13 | R28 | R33 | R33 | | | |
| 7500 | R13 | R13 | R13 | R13 | R13 | R28 | R28 | R28 | | | |
| 10000 | R13 | R13 | R13 | R13 | R13 | R28 | R28 | R28 | | | |

| Tabela A10 | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|
| Pré-dimensionamento de Reservatório Hidropneumático | | | | | | | | | | | |
| Tubulação Principal: Diâmetro Nominal 700 mm | | | | | | | | | | | |
| Carga (m) Ext. (m) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 | | |
| 50 | | | | | | | | | | | |
| 100 | | | | | | | | | | | |
| 200 | | | | | | | | | | | |
| 400 | R34 | | | | | | | | | | |
| 500 | R14 | R29 | R35 | R35 | | | | | | | |
| 750 | R14 | R29 | R29 | R35 | R35 | | | | | | |
| 1000 | R14 | R29 | R29 | R34 | R35 | R35 | | | | | |
| 1500 | R14 | R29 | R29 | R29 | R34 | R35 | R35 | | | | |
| 2000 | R14 | R29 | R29 | R29 | R29 | R34 | R35 | R43 | | | |
| 3000 | R14 | R29 | R29 | R29 | R29 | R29 | R34 | R43 | | | |
| 4000 | R14 | R29 | R29 | R29 | R29 | R29 | R29 | R35 | | | |
| 5000 | R14 | R29 | R29 | R29 | R29 | R29 | R29 | R34 | | | |
| 7500 | R14 | R29 | | | |
| 10000 | R14 | R29 | | | |

| Tabela A11 | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|
| Pré-dimensionamento de Reservatório Hidropneumático | | | | | | | | | | | |
| Tubulação Principal: Diâmetro Nominal 800 mm | | | | | | | | | | | |
| Carga (m) Ext. (m) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 | | |
| 50 | | | | | | | | | | | |
| 100 | | | | | | | | | | | |
| 200 | | | | | | | | | | | |
| 400 | R35 | R36 | | | | | | | | | |
| 500 | R24 | R36 | | | | | | | | | |
| 750 | R24 | R35 | | | | | | | | | |
| 1000 | R24 | R24 | R24 | R36 | R36 | | | | | | |
| 1500 | R24 | R24 | R24 | R24 | R30 | R36 | | | | | |
| 2000 | R24 | R24 | R24 | R24 | R24 | R35 | R36 | | | | |
| 3000 | R24 | R24 | R24 | R24 | R24 | R24 | R36 | R36 | | | |
| 4000 | R24 | R36 | | | |
| 5000 | R24 | | | |
| 7500 | R24 | | | |
| 10000 | R24 | | | |

| Tabela A12 Pré-dimensionamento de Reservatório Hidropneumático Tubulação Principal: Diâmetro Nominal 900 mm | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|--|--|--|
| Carga (m) Ext. (m) | 10 | 50 | 100 | 150 | 200 | | | | | |
| 100 | | | | | | | | | | |
| 500 | R36 | | | | | | | | | |
| 1000 | R25 | R37 | | | | | | | | |
| 2000 | R25 | R37 | R37 | | | | | | | |
| 3000 | R25 | R36 | R37 | | | | | | | |
| 4000 | R25 | R36 | R37 | R37 | | | | | | |
| 5000 | R25 | R36 | R36 | R37 | | | | | | |
| 7500 | R25 | R25 | R36 | R36 | | | | | | |
| 10000 | R25 | R25 | R36 | R36 | | | | | | |
| Tabela A13 Pré-dimensionamento de Reservatório Hidropneumático Tubulação Principal: Diâmetro Nominal 1000 mm | | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| Carga (m) Ext. (m) | 10 | 50 | 100 | 150 | 200 | |
| 100 | | | | | | |
| 500 | R37 | | | | | |
| 1000 | R37 | | | | | |
| 2000 | R37 | R37 | | | | |
| 3000 | R37 | R37 | | | | |
| 4000 | R37 | R37 | R37 | | | |
| 5000 | R37 | R37 | R37 | R44 | | |
| 7500 | R37 | R37 | R37 | R37 | | |
| 10000 | R37 | R37 | R37 | R37 | | |

Legenda:

Locais em que necessita-se a instalação de outro dispositivo de proteção associado ao reservatório hidropneumático.

| Tabela A14 Pré-dimensionamento de Reservatório Hidropneumático Tubulação Principal: Diâmetro Nominal 1500 mm | | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| Carga (m) Ext. (m) | 10 | 50 | 100 | 150 | 200 | |
| 100 | | | | | | |
| 500 | | | | | | |
| 1000 | R38 | | | | | |
| 2000 | R38 | | | | | |
| 3000 | R38 | R45 | | | | |
| 4000 | R38 | R45 | | | | |
| 5000 | R38 | R38 | R45 | | | |
| 7500 | R38 | R38 | R45 | R45 | | |
| 10000 | R38 | R38 | R38 | R45 | | |

Legenda:

Locais em que necessita-se a instalação de outro dispositivo de proteção associado ao reservatório hidropneumático.

| Tabela A15 Pré-dimensionamento de Reservatório Hidropneumático Tubulação Principal: Diâmetro Nominal 2000 mm | | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| Carga (m) Ext. (m) | 10 | 50 | 100 | 150 | 200 | |
| 100 | | | | | | |
| 500 | | | | | | |
| 1000 | R39 | | | | | |
| 2000 | R39 | | | | | |
| 3000 | R39 | | | | | |
| 4000 | R39 | | | | | |
| 5000 | R39 | R46 | | | | |
| 7500 | R39 | R46 | R48 | | | |
| 10000 | R39 | R46 | R47 | | | |

Legenda:

Locais em que necessita-se a instalação de outro dispositivo de proteção associado ao reservatório hidropneumático.

APÊNDICE B

Neste apêndice são apresentados os gráficos da vazão em regime permanente em função da extensão à jusante do reservatório, obtidos a partir dos resultados das simulações hidrúlicas realizadas.

Gráfico B1 - Linha Principal - DN 80 mm



Gráfico B2 - Linha Principal - DN 100 mm



Gráfico B3 - Linha Principal - DN 150 mm



Gráfico B4 - Linha Principal - DN 200 mm



Extensão à jusante do RHO (m)

Gráfico B5 - Linha Principal - DN 300 mm



Gráfico B6 - Linha Principal - DN 400 mm



Gráfico B7 - Linha Principal - DN 500 mm



Gráfico B8 - Linha Principal - DN 600 mm



Gráfico B9 - Linha Principal - DN 700 mm



Gráfico B10 - Linha Principal - DN 800 mm



Gráfico B11 - Linha Principal - DN 900 mm



Gráfico B12 - Linha Principal - DN 1000 mm



109

Gráfico B13 - Linha Principal - DN 1500 mm



Gráfico B14 - Linha Principal - DN 2000 mm



ANEXO 1

Neste anexo são apresentados os dados das tubulações de ferro dúctil utilizadas como referência nas simulações hidráulicas da presente pesquisa.

| | Dimensões e Massas | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------------------|--------------|----------|---------------------|---------------|
| Diâmetro Nominal (mm) | Comprimento I útil do tubo | Diâmetro Externo | Espessura da parede do tubo | Massas | | Diâmetro Interno | Celeridade |
| | | | | Por metro | Total | (mm) | $(m/s)^{(1)}$ |
| | (m) | (mm) | (mm) | (kg) | (kg) | | |
| 80 | 6 | 98 | 6 | 14,55 | 87,28 | 86 | 1362,25 |
| 100 | 6 | 118 | 6,1 | 18 | 108,04 | 105,8 | 1340,69 |
| 150 | 6 | 170 | 6,3 | 27,26 | 163,58 | 157,4 | 1290,27 |
| 200 | 6 | 222 | 6,4 | 36,7 | 220,06 | 209,2 | 1244,79 |
| 300 | 6 | 326 | 7,2 | 60,42 | 362,52 | 311,6 | 1189,45 |
| 400 | 6 | 429 | 8,1 | 94,73 | 568,4 | 412,8 | 1153,62 |
| 500 | 6 | 532 | 9 | 129,32 | 775,94 | 514 | 1127,17 |
| 600 | 6 | 635 | 9,9 | 168,41 | 1010,48 | 615,2 | 1106,83 |
| 700 | 7 | 738 | 10,8 | 215,13 | 1505,91 | 716,4 | 1090,70 |
| 800 | 7 | 842 | 11,7 | 264,07 | 1848,54 | 818,6 | 1077,28 |
| 900 | 7 | 945 | 12,6 | 317,22 | 2220,59 | 919,8 | 1066,44 |
| 1000 | 7 | 1048 | 13,5 | 375,06 | 2625,44 | 1021 | 1057,31 |
| 1500 | 8,16 | 1565 | 18 | 764,2 | 6235,88 | 1529 | 1026,74 |
| 2000 | 8,13 | 2082 | 22,5 | 1241,5 | 10093,39 | 2037 | 1009,63 |

Tabela 4. Dados dos tubos de ferro dúctil utilizados

Fonte: Saint-Gobain Canalização. Internet: http://www.saint-gobain-canalizacao.com.br (data: 01/01/2008). Notas: (1) Celeridade calculada para água.

| ei viço mannıssi veis | I ubo Juniu Elubricu Oli | |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PSA Pressão de serviço admissível (MPa) | PMS Pressão máxima de serviço (MPa) | PTA Pressão de teste admissível (MPa) |
| 6,4 | 7,7 | 8,2 |
| 6,4 | 7,7 | 8,2 |
| 6,4 | 7,7 | 8,2 |
| 6,2 | 7,4 | 7,9 |
| 4,9 | 5,9 | 6,4 |
| 4,2 | 5,1 | 5,6 |
| 3,8 | 4,6 | 5,1 |
| 3,6 | 4,3 | 4,8 |
| 3,4 | 4,1 | 4,6 |
| 3,2 | 3,9 | 4,4 |
| 3,1 | 3,7 | 4,2 |
| 3 | 3,6 | 4,1 |
| 2,7 | 3,3 | 3,8 |
| 2,6 | 3,1 | 3,6 |
| | PSA Pressão de serviço admissível (MPa) 6,4 6,4 6,2 4,9 4,2 3,8 3,6 3,1 3 2,7 2,6 | PSA PMS Pressão de serviço admissível Pressão máxima de serviço (MPa) $6,4$ $7,7$ $6,4$ $7,7$ $6,4$ $7,7$ $6,4$ $7,7$ $6,4$ $7,7$ $6,4$ $7,7$ $6,4$ $7,7$ $6,2$ $7,4$ $4,9$ $5,9$ $4,2$ $5,1$ $3,8$ $4,6$ $3,6$ $4,3$ $3,4$ $4,1$ $3,2$ $3,9$ $3,1$ $3,7$ 3 $3,6$ $2,7$ $3,3$ $2,6$ $3,1$ |

Tabela 5. Pressões de Serviço Admissíveis - Tubo Junta Elástica Classe K9

Fonte: Saint-Gobain Canalização. Internet: http://www.saint-gobain-canalizacao.com.br (data: 01/01/2008). Nota: 1 MPa = 10,19 kgf/cm² = 101,9 m.c.a.

Onde:

- PSA Pressão de serviço admissível: Pressão interna, excluindo o golpe de ariete, que um componente pode suportar com total segurança, de forma contínua, em regime hidráulico permanente;
- **PMS Pressão máxima de serviço**: Pressões internas máxima, incluindo o golpe de ariete, que um componente pode suportar em serviço;
- PTA Pressão de teste admissível: Pressões hidrostáticas máxima, que pode ser aplicada no teste de campo, a um componente de uma canalização recéminstalada.