



MARINHA DO BRASIL
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA
CURSO DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA
MERCANTE



JOÃO CARLOS VIEIRA COSTA



HIDRODINÂMICA APLICADA A MÁQUINAS

**RIO DE JANEIRO
2013**

JOÃO CARLOS VIEIRA COSTA

HIDRODINÂMICA APLICADA A MÁQUINAS

Monografia apresentada como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador: Professor Engenheiro Hermann Regazzi Gerk

Rio de Janeiro

2013

JOÃO CARLOS VIEIRA COSTA

HIDRODINÂMICA APLICADA A MÁQUINAS

Monografia apresentada como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Data da Aprovação: ____/____/____

Orientador (a): _____

Professor

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

A minha mãe, Norma, minha avó,
Néa, minha tia, Tânia, e minha tia avó,
Naysa, aos quais devo tudo em minha
vida.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, tia, avós e meus amigos, que me deram forças durante o curso e me mostraram que esforço e dedicação são primordiais para alcançar nossos objetivos.

Ao meu professor de inglês Jander Barbosa.

Ao meu orientador professor Herman pelo auxílio e disponibilidade.

Obrigado pelo apoio.

RESUMO

Este trabalho visa demonstrar de forma simplificada a hidrodinâmica e suas aplicações ao curso de Máquinas, bem como abordar recursos oriundos da Mecânica dos Fluidos, os quais estão presentes diariamente na vida de um Oficial de Máquinas. O tipo de abordagem será dividido, sendo feito o uso de instrumentos matemáticos ou descrevendo apenas o tópico em questão.

Palavras-chave: Hidrodinâmica. Máquinas de fluxo. Golpe de Aríete. Perda de Carga.

ABSTRACT

This work demonstrates a simplified hydrodynamics and its applications to the course of machines, as well as address proceeds of Fluid Mechanics, which are present in the daily life of an Engineer Officer. The approach will be divided, being done using mathematical tools or describing only the topic in question.

Key-words: Hydrodynamics. Flow Machines. Water Hammer. Load Loss.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	18
1 HIDRODINÂMICA	19
1.1 HISTÓRIA DA HIDRÔDINÂMICA	19
1.1.1 RESUMO HISTÓRICO	19
1.1.2 TABELA	21
1.2 PRINCIPAIS RELAÇÕES MATEMÁTICAS	24
1.2.1 EQUAÇÃO DE BERNOULLI	25
1.2.2 EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE	25
1.2.3 NÚMERO DE REYNOLDS	26
1.2.4 RELAÇÃO ENTRE O IMPULSO E O MOMENTO LINEAR	26
2 MÁQUINAS DE FLUXO	27
2.1 TURBO MÁQUINAS	27
2.1.1 BOMBAS	28
2.1.2 COMPRESSORES	29
2.1.3 TURBINAS	29
2.1.3.1 TURBINAS DE AÇÃO	30
2.1.3.2 TURBINAS DE REAÇÃO	30
3 APLICAÇÃO AOS ESCOAMENTOS	32
3.1 ESCOAMENTO VISCOZO EM DUTOS	32
3.1.1 REGIMES DE NÚMEROS DE REYNOLDS	32
3.1.2 PERDA DE CARGA E FATOR DE ATRITO	33

3.2 ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL	34
3.3 ESCOAMENTO EM CANAIS ABERTOS	34
4 GOLPE DE ARÍETE	35
4.1 GOLPE DE ARÍETE EM SISTEMAS HIDRÁULICOS	35
4.2 ANÁLISE	35
4.3 CONDUTOS POR BOMBEAMENTO E POR GRAVIDADE	37
4.4 COMENTÁRIOS SOBRE A OCORRÊNCIA DE GOLPE DE ARÍETE EM SISTEMAS HIDRÁULICOS	37
4.5 DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO CONTRA O GOLPE DE ARÍETE	38
4.6 VOLANTES DE INÉRCIA	39
4.7 VENTOSAS	39
4.8 RESERVATÓRIOS UNIDIRECIONAIS	40
4.9 BY-PASS	41
4.10 CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO	41
4.11 COMENTÁRIOS SOBRE A CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO	42
4.12 RESERVATÓRIOS HIDROPNEUMÁTICOS	42
4.13 COMENTÁRIO SOBRE RESERVATÓRIOS HIDROPNEUMÁTICOS	43
4.14 VÁLVULAS DE ALÍVIO	43
4.15 VÁLVULAS DE RETENÇÃO	44
4.16 OUTROS MEIOS DE PROTEÇÃO	45
4.17 COMENTÁRIOS FINAIS	46
CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

INTRODUÇÃO

O mundo está rodeado por fluidos como água e ar essenciais para nossa vida. Neles nos deslocamos e sofremos consequências das alterações que se produzem naturalmente ou provocadas pelo próprio homem. Também é fundamental a presença dos fluidos na conversão, transporte e utilização da energia em diferentes campos da engenharia.

O movimento dos fluidos pode ser estudado da mesma forma que o movimento de corpos sólidos usando-se as leis fundamentais da física juntamente com as propriedades físicas dos fluidos. Conforme a natureza do escoamento será a complexidade de sua análise. O movimento das ondas do mar, furacões e tornados ou outros fenômenos atmosféricos são exemplos de escoamentos altamente complexos. Contudo, podem ser realizadas análises com relativo sucesso quando são feitas simplificações do escoamento.

O estudo de Mecânica dos Fluidos é essencial para analisar qualquer sistema no qual o fluido produz trabalho. No projeto de veículos para transporte terrestre marítimo e espacial; no projeto de turbo máquinas, na lubrificação na Engenharia Biomédica, no estudo da aerodinâmica das aves, insetos, animais e até no esporte são utilizadas as lei básicas de Mecânica dos Fluidos.

CAPÍTULO 1

HIDRODINÂMICA

Hidrodinâmica foi o termo adotado para o estudo teórico ou matemático do comportamento de fluidos potenciais ou não viscosos. O termo Hidráulica foi utilizado para descrever aspectos experimentais do comportamento real dos fluidos (especialmente experiências com água). Tais estudos caminharam de forma paralela muitas vezes com resultados experimentais que não podiam ser explicados pelos teóricos.

Em 1904 o cientista Alemão Ludwind Prandtl introduziu o conceito de camada limite unificando finalmente as abordagens hidrodinâmicas e de hidráulica. Por este motivo é geralmente aceito como o fundador da Mecânica dos Fluidos moderna.

1.1 HISTÓRIA DA HIDRODINÂMICA

1.1.1 RESUMO HISTÓRICO

O estudo da Mecânica dos Fluidos teve início antes de Cristo, estimulada pelas necessidades de sistemas de distribuição de água para as pessoas e para a irrigação, assim como para o projeto de barcos para a navegação e os dispositivos e armas de guerra. Naquela época o seu desenvolvimento foi empírico sem utilizar conceitos matemáticos nem da mecânica, entretanto, eles serviram como base para o desenvolvimento ocorrido na civilização grega antiga e no império romano.

Os primeiros escritos conhecidos sobre a Mecânica dos Fluidos são os de Arquimedes (287 – 212 a.C.), abordando os princípios da hidrostática e da flutuação. No início da era cristã, Sextus Julius Frontinus (40 – 103 d.C.), engenheiro romano, descreveu detalhadamente sofisticados sistemas de distribuição de água construídos pelos romanos.

Posteriormente durante o Renascimento, novas contribuições são alcançadas no campo da hidráulica e mecânica experimental com Leonardo da Vinci (1452 – 1519) e Galileu Galilei (1564 – 1642). Na primeira metade do séc. XVII Isaac Newton enunciou as leis do movimento. Mais tarde, em 1755, Euler, estabeleceu equações diferenciais básicas do movimento. Estudos e equações sobre energia foram estabelecidos por Bernoulli e

D'Alembert. Após todos os conhecimentos alcançados no séc. XVIII, os estudiosos se dividiram em duas ciências que se desenvolveram separadamente.

A Hidrodinâmica e a Hidráulica. A Hidrodinâmica tratava do estudo teórico e matemático, com análises do fluido perfeito sem atrito. A Hidráulica tratava dos aspectos experimentais do comportamento real dos fluidos.

No fim do séc. XIX. Navier (1827) e Stokes (1845), em trabalhos independentes, apresentam as equações de movimento na forma geral e com a inclusão do conceito de viscosidade. Tais equações restritas aos denominados fluidos newtonianos. Apesar disto, muitos resultados experimentais obtidos pelos estudiosos da Hidráulica não eram ainda explicados por tais equações.

No fim do séc. XIX, as experiências realizadas por Reynolds começaram a elucidar possibilidades de aplicações das equações de Navier-Stokes pelo estabelecimento do conceito de dois diferentes tipos de escoamentos: o laminar e o turbulento. Em 1904, o professor alemão Ludwig Prandtl (1857 – 1953) apresenta o conceito de "camada limite", representando a base para a reunificação das duas abordagens até então utilizadas na Mecânica dos Fluidos.

A idéia proposta por Prandtl é que os escoamentos em torno de fronteiras podem ser subdivididos em duas regiões: uma próxima às paredes, onde os efeitos viscosos são muito importante (camada fina de fluido – camada limite) e outra, adjacente à esta, onde o fluido se comporta como um fluido ideal, sem atrito. Este conceito forneceu a ligação para unificar os conceitos teóricos dos que trabalhavam com a hidrodinâmica e com a hidráulica.

Após Prandtl, muitos outros contribuíram para o engrandecimento dos conhecimentos da Mecânica dos Fluidos. Com o primeiro vôo motorizado, no início do séc. XX, aumentou o interesse pela Aerodinâmica, pois era necessário projetar aviões cada vez mais modernos, o que provocou um rápido desenvolvimento desta área.

1.1.2 TABELA 1

Arquimedes (287 – 212 a.C.)	Estabeleceu os princípios básicos do empuxo e da flutuação.
Sextus Juluis Frontinus (40 – 130)	Escreveu um tratado sobre os métodos romanos de distribuição de água.
Leonardo da Vinci (1452 – 1519)	Expressou o princípio da continuidade de modo elementar; observou e fez análises de muitos escoamentos básicos e projetou algumas máquinas hidráulicas.
Galileu Galilei (1562 – 1642)	Estimulou indiretamente a experimentação em hidráulica; revisou o conceito aristotélico de vácuo.
Evangelista Torricelli (1608 – 1647)	Relacionou a altura barométrica com o peso da atmosfera e a forma do jato de líquido com as trajetórias relativas à queda livre.
Blaise Pascal (1623 – 1662)	Esclareceu totalmente o princípio de funcionamento do barômetro, da prensa hidráulica e da transmissibilidade de pressão.
Isaac Newton (1642 – 1727)	Explorou vários aspectos da resistência aos escoamentos, a natureza das ondas e descobriu as contrações nos jatos.
Henri de Pitot (1695 – 1771)	Construiu um dispositivo duplo tubo para indicar a velocidade nos escoamentos de água a partir da diferença de altura entre duas colunas de líquido.

Daniel Bernoulli (1700 – 1782)	Fez muitas experiências e escreveu sobre o movimento dos fluidos (é de sua autoria o termo "hidrodinâmica"); organizou as técnicas manométricas de medidas e, adotando o princípio primitivo de conservação de energia, explicou o funcionamento destes dispositivos; propôs a propulsão a jato.
Leonhard Euler (1707 – 1783)	Explicou o papel da pressão nos escoamentos; formulou as equações básicas do movimento e o chamado teorema de Bernoulli; introduziu o conceito de cavitação e descreveu os princípios de operação das máquinas centrífugas.
Jean le Rond d'Alembert (1717 – 1783)	Introduziu as noções dos componentes da velocidade e aceleração, a expressão diferencial da continuidade e o paradoxo da resistência nula a movimento não uniforme em regime permanente.
Giovanni Battista Venturi (1746 – 1822)	Realizou testes de vários bocais, particularmente as contrações e expansões cônicas.
Louis Marie Henri Navier (1785 – 1836)	Estendeu as equações do movimento para incluir as forças "moleculares".
Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen (1797-1884)	Conduziu estudos originais sobre a resistência nos escoamentos e na transição entre escoamento laminar e turbulento.
Jean Louis Poiseuille (1799 – 1869)	Realizou testes precisos sobre a resistência nos escoamentos laminares em tubos capilares.

Henri Philibert Gaspard Darcy (1803 – 1858)	Estudou experimentalmente a resistência ao escoamento na filtração e o escoamento em tubos; iniciou os estudos sobre o escoamento em canal aberto (realizado por Bazin).
Julius Weisbach (1806 – 1871)	Incorporou a hidráulica nos tratados de Engenharia Mecânica utilizando resultados de experimentos originais. Descreveu vários escoamentos e as equações para o cálculo da variação de pressão nos escoamentos.
Robert Manning (1816 – 1897)	Propôs muitas fórmulas para o cálculo da resistência em escoamentos em canal aberto.
George Gabriel Stokes (1819 – 1903)	Derivou analiticamente várias relações importantes da Mecânica dos Fluidos, que variam desde a mecânica das ondas até a resistência viscosa nos escoamentos, particularmente a associada ao movimento de esferas num fluido.
Ernst Mach (1838 – 1916)	Foi um dos pioneiros da aerodinâmica supersônica.
John William Strutt, (1842 – 1919)	Investigou a hidrodinâmica do colapso de bolhas, movimento das ondas, instabilidade dos jatos, analogia dos escoamentos laminares e similaridade dinâmica.
Moritz Weber (1871 – 1951)	Enfatizou a utilização dos princípios da similaridade nos estudos dos escoamentos dos fluidos e formulou um parâmetro para a similaridade capilar.

Ludwig Prandtl (1875 – 1953)	Introduziu o conceito de camada limite. É considerado o fundador da Mecânica dos Fluidos moderna.
Lewis Ferry Moody (1880 – 1953)	Propôs muitas inovações nas máquinas hidráulicas e um método para correlacionar os dados de resistência ao escoamento em dutos, o qual é utilizado até hoje.
Theodore Von Karman (1881 – 1963)	Foi um dos maiores expoentes da Mecânica dos Fluidos do séc. XX. Contribuiu de modo significativo para o conhecimento da resistência superficial, turbulência e fenômeno da esteira.
Paul Richard Heinrich Blasius (1883 – 1970)	Foi aluno de Prandtl e obteve a solução analítica das equações da camada-limite. Também demonstrou que a resistência ao escoamento em tubos está relacionada ao número de Reynolds.

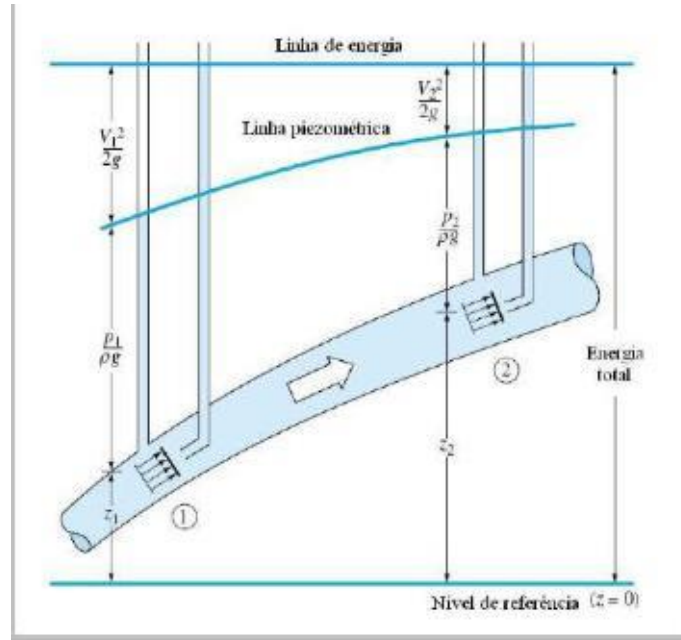
1.2 PRINCIPAIS RELAÇÕES MATEMÁTICAS

Serão apresentadas, de forma resumida, as principais relações matemáticas, necessárias ao desenvolvimento da hidrodinâmica.

1.2.1 EQUAÇÃO DE BERNOULLI

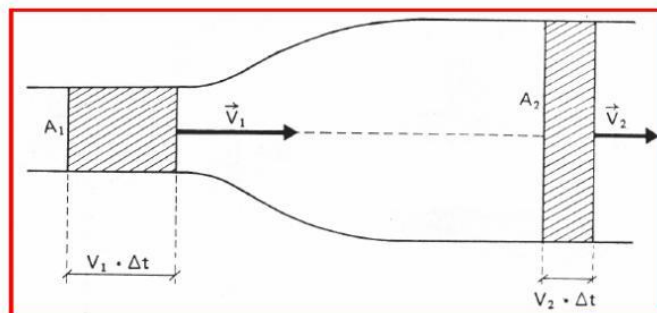
Na maioria dos problemas, relacionados com escoamento de fluidos em dutos e tubulações, se requer a determinação das condições de uma seção do sistema quando se conhece alguma das condições de outra seção. Isto é ilustrado na figura abaixo, onde se apresenta um sistema de distribuição de fluido com o escoamento da seção 1 para a seção 2. Em qualquer seção do sistema estamos interessados na pressão, velocidade e elevação do fluido. A elevação (z) é definida como a distância vertical desde algum sistema de referência a um ponto de interesse.

Quando se trata de dutos a elevação é medida até a linha central da seção de interesse. A equação utilizada neste tipo de problema é conhecida como Equação de Bernoulli, deduzida a partir da equação de conservação da energia.



$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2$$

1.2.2 EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE



$$\sum_e^n Q_m = \sum_s^n Q_m \quad \text{equação 3.22}$$

$$\sum_e^n (\rho \cdot v \cdot A) = \sum_s^n (\rho \cdot v \cdot A) \quad \text{equação 3.23}$$

1.2.3 NÚMERO DE REYNOLDS

A natureza do escoamento nos tubos pode ser laminar ou turbulento. Tais regimes são dependentes do valor do número de Reynolds.

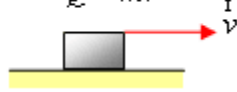
$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

sendo

- v - velocidade média do fluido
- D - longitude característica do fluxo
- μ - viscosidade dinâmica do fluido
- ρ - massa específica do fluido

1.2.4 RELAÇÃO ENTRE O IMPULSO E O MOMENTO LINEAR

O impulso de uma força é igual à variação do momento linear.

$$\overset{I}{Q} = m \overset{I}{v}$$


The diagram shows a grey rectangular block resting on a yellow horizontal surface. A red arrow labeled $\overset{I}{v}$ points to the right from the center of the block, representing its velocity.

$$\boxed{\overset{I}{I} = \overset{I}{Q}_2 - \overset{I}{Q}_1 = \Delta \overset{I}{Q}}$$

CAPÍTULO 2

MÁQUINAS DE FLUXO

2.1 TURBOMÁQUINAS

As turbomáquinas dividem-se naturalmente naquelas que adicionam energia (bombas) e naquelas que extraem energia (turbinas). O prefixo turbo é uma palavra latina que significa rotação ou giro, apropriado para dispositivos rotativos.

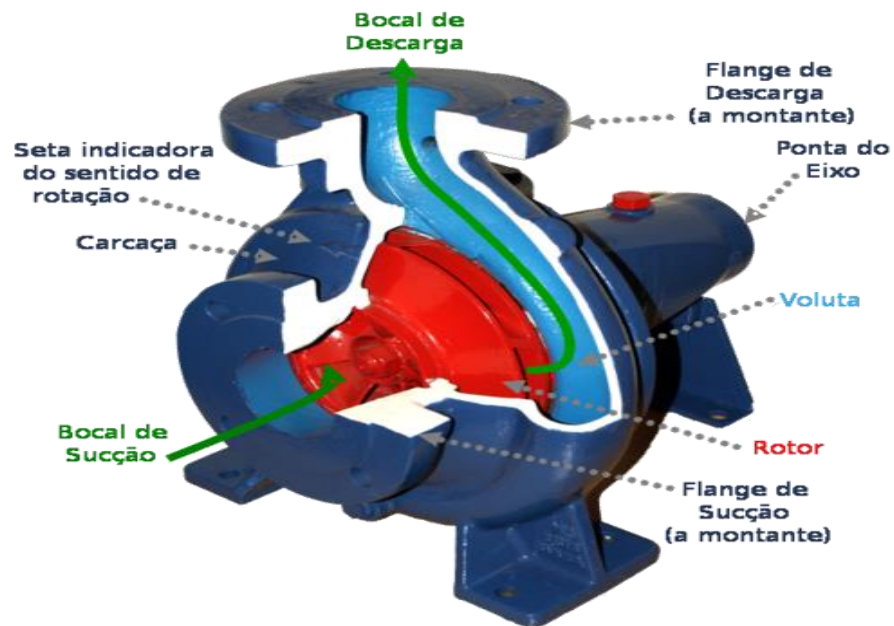
A bomba é a mais antiga máquina de transferência de energia para um fluido que se conhece. Há pelo menos dois projetos que datam de antes de Cristo: as rodas de água com conchas impulsionadas na parte inferior da roda, ou *noras*, usadas na Ásia e na África (1000 a.C) e a bomba de parafuso de Arquimedes (250 a.C), que ainda é fabricada nos dias de hoje para movimentar misturas líquido-sólido. Turbinas de rodas com remo eram usadas pelos romanos em 70 a.C.

As máquinas que fornecem líquidos são simplesmente chamadas de bombas, mas se gases são envolvidos, três diferentes termos são usuais, dependendo da elevação de pressão que se deseja obter. Se a elevação de pressão for muito pequena (alguns centímetros de altura de água), uma bomba de gás é chamada de ventilador, até 1 atm, usualmente chamada de soprador; e acima de 1 atm comumente é chamada de compressor.

2.1.1 BOMBAS

Há dois tipos básicos de bombas: as bombas de deslocamento positivo e as bombas dinâmicas ou de variação de quantidade de movimento. Há uma infinidade de cada tipo em uso no mundo hoje.

Bombas de deslocamento positivo forçam o movimento do fluido por meio de variações de volume. Uma cavidade se abre, e o fluido é mantido através de uma entrada. A cavidade então se fecha, e o fluido é comprimido através de uma saída. O coração dos mamíferos é um bom exemplo, e há muitos projetos mecânicos em uso.



As bombas dinâmicas simplesmente acrescentam quantidade de movimento ao fluido por meio de pás ou aletas que se movem rapidamente ou certos projetos especiais. Não há um volume fechado: o fluido aumenta sua quantidade de movimento enquanto se move através de passagens abertas e então converte sua alta velocidade em aumento de pressão, saindo por uma seção em forma de difusor. As bombas dinâmicas em geral proporcionam uma vazão maior e uma descarga muito mais estável do que as BDPs, mas são ineficazes para lidar com líquidos de alta viscosidade. As bombas dinâmicas também necessitam geralmente de escorvamento; se estiverem cheias de gás não podem aspirar um líquido que está em um nível abaixo de uma entrada da bomba.

A bomba de deslocamento positivo, por outro lado, é autoescorvante para a maioria das aplicações. Uma bomba dinâmica pode fornecer vazões muito altas (até $1.200 \text{ m}^3/\text{min}$), mas usualmente com elevações moderadas de pressão (algumas atmosferas). Ao contrário, uma bomba de deslocamento positivo pode operar com pressões muito altas (até 300 atm), mas, geralmente, produz vazões baixas.

2.1.2 COMPRESSORES

Os compressores são da família das máquinas operatrizes de fluxo compressível, assim como os ventiladores. São utilizados para proporcionar a elevação da pressão de um gás ou escoamento gasoso. Nos processos industriais, a elevação de pressão requerida pode variar desde cerca de 1,0 atm até centenas de ou milhares de atmosferas.

Em geral, são classificados em volumétricos e dinâmicos. Os compressores volumétricos são divididos em alternativos e rotativos e, os compressores dinâmicos dividem-se em centrífugos e axiais.



2.1.3 TURBINAS

Turbina é uma turbo máquina hidráulica que absorve energia hidráulica e transmite energia mecânica sob forma de eixo girante. Distinguem-se em turbinas de ação e de reação.

2.1.3.1 TURBINAS DE AÇÃO

Nas turbinas de ação, a roda gira no ar à pressão atmosférica local. Toda a energia hidráulica utilizável do líquido é transformada em energia cinética (jatos de grande velocidade) antes de atacar a roda. São conhecidas por turbinas de Pelton.



2.1.3.2 TURBINAS DE REAÇÃO

Nas turbinas de reação, a roda é completamente imersa e utiliza a energia hidráulica, em parte, sob a forma de energia cinética. O escoamento é semi-axial (às vezes, radial) e axial. São conhecidas por turbinas Francis, Dériaz, Hélice e Kaplan.



Os elementos constitutivos de uma turbina são análogos ao de uma bomba, porém com funções inversas. Assim, a turbina propriamente dita compreende, em geral, a caixa espiral, por meio da qual a água é pré-distribuída pelas pás diretrizes fixas e onde se dá a primeira transformação da energia potencial de pressão em energia cinética (em uma bomba, energia cinética em energia potencial de pressão); o distribuidor, formado por tubeiras convergentes (corresponde a coroa diretriz em uma bomba, formada por difusores), por meio do qual a água é direcionada à roda e onde também se dá a segunda transformação da energia potencial de pressão em energia cinética; e a roda, órgão ativo, munido de pás, que transforma a energia hidráulica absorvida em energia mecânica sob a forma de eixo girante.

CAPÍTULO 3

APLICAÇÕES AOS ESCOAMENTOS

3.1 ESCOAMENTO VISCOSO EM DUTOS

3.1.1 REGIMES DE NÚMEROS DE REYNOLDS

Há bastante teoria disponível se desprezarmos efeitos importantes como a viscosidade e a compressibilidade, mas não existe teoria geral, e talvez jamais venha a existir. O principal motivo é que o comportamento do fluido sofre uma mudança profunda e instigante para números de Reynolds moderados. O escoamento deixa de ser suave e permanente (laminar) e torna-se flutuante e agitado (turbulento). O processo dessa mudança é chamado transição para a turbulência. A transição depende de muitos efeitos, como, por exemplo, a rugosidade da

parede ou as flutuações da corrente de entrada, mas o parâmetro básico é o número de Reynolds.

A turbulência pode ser detectada por medição através de um instrumento sensível e pequeno, tal como um anemômetro de fio quente ou um transdutor de pressão piezelétrico.



O escoamento permanecerá permanente em média, mas irá revelar flutuações rápidas e aleatórias se a turbulência estiver presente. Se o escoamento é laminar, podem existir perturbações naturais ocasionais que são amortecidas rapidamente. Se estiver ocorrendo transição, haverá flutuações de turbulência na forma de rajadas intermitentes, pois o aumento do número de Reynolds causa um colapso ou uma instabilidade do escoamento laminar. Para números de Reynolds suficientemente altos, o escoamento irá flutuar continuamente, sendo denominado escoamento totalmente turbulento. As flutuações, que em geral variam de 1% a 20% da velocidade média, não são estritamente periódicas, mas aleatórias, englobando uma gama contínua, ou um espectro, de frequências. Em um escoamento típico de túnel de vento com altos Re , a frequência da turbulência varia de 1 a 10000 Hz, e o comprimento de onda, de 0,01 a 400 cm. Nos escoamentos com superfície livre, a turbulência pode ser observada diretamente.

3.1.2 PERDA DE CARGA E FATOR DE ATRITO

A equação abaixo correlaciona a perda de carga para problemas de escoamento em tubos. A equação mostra que, h (diferença de altura devido a perda de carga no sistema) é proporcional a (L/D) , relação entre a o diâmetro e o comprimento do tubo) e é

aproximadamente proporcional ao quadrado da velocidade V , e, g é o valor da aceleração da gravidade.

$$h_f = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2 \cdot g}$$

O parâmetro adimensional f é chamado de fator de atrito de Darcy, em homenagem a Henry Darcy (1803-1858), engenheiro francês cujos experimentos com escoamentos em tubos, em 1857, estabeleceram pela primeira vez o efeito da rugosidade sobre o atrito.

$$f = F(\text{Re}, \varepsilon/d, \text{formato do duto})$$

A grandeza ε é a altura da rugosidade da parede, que é importante no escoamento turbulento em tubos (mas não no escoamento laminar). Adicionamos o efeito do “formato do duto” na primeira equação sobre perda de carga, para nos alertar que dutos de seção quadrada, triangular ou de outro formato não circular apresentam um fator de atrito bem diferentes do duto circular.

3.2 ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL

Quando um fluido se move a velocidades comparáveis à sua velocidade do som, as variações de massa específica tornam-se significativas e o escoamento é dito *compressível*. Tais escoamentos são difíceis de ocorrer em líquidos, pois seriam necessárias pressões da ordem de 1000 atm para gerar velocidades sônicas. Em gases, porém, uma razão de pressões de apenas 2:1 é susceptível de causar um escoamento sônico. Logo, o escoamento compressível de gases é bem comum, e esse assunto normalmente é chamado de *dinâmica dos gases*.

Provavelmente, os dois efeitos mais importantes e mais característicos da compressibilidade sobre o escoamento são o *bloqueio* (do inglês *choking*), sob o qual a vazão de escoamento em um duto é limitada de modo marcante pela condição sônica e as *ondas de*

choque, que se caracterizam por variações praticamente descontínuas de propriedades em um escoamento supersônico.

A análise de escoamentos compressíveis esta repleta de equações algébricas complicadas, muitas das quais são difíceis de ser manipuladas ou invertidas. Em consequência, durante quase um século, os livros-textos.

3.2 ESCOAMENTO EM CANAIS ABERTOS

Um escoamento em *canal aberto* representa um escoamento com uma superfície livre em contato com a atmosfera, como ocorre em um rio, um canal ou uma calha. Os escoamentos em dutos fechados são completamente cheios de fluido, podendo ser líquido ou gás, não apresentam uma superfície livre e são conduzidos por um gradiente de pressão ao longo do eixo do duto. Os escoamentos em canais abertos são conduzidos apenas pela gravidade, e o gradiente de pressão na interface com a atmosfera desprezível. O balanço de forças básico em um canal aberto é entre a gravidade e o atrito.

Os escoamentos em canais abertos constituem uma modalidade da mecânica dos fluidos especialmente importante para engenheiros civis e ambientais. Eles precisam prever as vazões e profundidades de água que resultam de determinada geometria de canal, seja ela natural ou artificial, e de determinada rugosidade da superfície molhada. Quase sempre o fluido em destaque é a água, e o tamanho do canal usualmente é grande. Portanto, os escoamentos em canais abertos são geralmente turbulentos, tridimensionais, às vezes não permanentes e com frequência muito complexa.

CAPÍTULO 4

GOLPE DE ARÍETE

4.1 GOLPE DE ARÍETE EM SISTEMAS HIDRÁULICOS

Em hidráulica, a análise dos vários aspectos que a compreende, se defronta com um tema dos mais complexos e que nos últimos tempos tem tido notáveis progressos, que é o que se refere aos fenômenos transitórios. O desenvolvimento deste tema tem se verificado não só devido à sua grande importância em projetos de sistemas hidráulicos, mas também devido às contribuições dos incessantes avanços da informática. Dentre esses fenômenos, o mais

comum, que ocorre com muita frequência, e um dos mais interessantes, é o que se conhece como *golpe de aríete*.

Por *golpe de aríete* se denominam as variações de pressão decorrentes de variações da vazão, causadas por alguma perturbação, voluntária ou involuntária, que se imponha ao fluxo de líquidos em condutos, tais como operações de abertura ou fechamento de válvulas, falhas mecânicas de dispositivos de proteção e controle, parada de turbinas hidráulicas e ainda de bombas causadas por queda de energia no motor, havendo, no entanto, outros tipos de causas.

É o caso típico de condutos de recalque providos de válvulas de retenção logo após a bomba, e sem dispositivos de proteção. Neste caso a situação de ocorrência do golpe de forma mais desfavorável e com mais frequência, é aquela decorrente da interrupção brusca da energia elétrica fornecida ao motor da bomba que alimenta o conduto. É nesta situação onde corriqueiramente se verificam valores extremos para o golpe de aríete.

Durante o fenômeno do golpe de aríete, a pressão poderá atingir níveis indesejáveis, que poderão causar sérios danos ao conduto ou avarias nos dispositivos nele instalados. Danos como ruptura de tubulações por sobrepressão, avarias em bombas e válvulas, colapso de tubos devido a vácuo, etc.

4.2 ANÁLISE

Assim é que torna-se necessária, na engenharia hidráulica, a análise do golpe, para que se possa quantificá-lo numericamente e, com isto, tornar possível a adoção de medidas preventivas cabíveis, que venham anular ou minimizar seus efeitos indesejáveis. Efetivamente esta análise se faz necessária, porque o desconhecimento dos efeitos do golpe de aríete pode ocasionar o super ou o subdimensionamento, isto é, projetos de sistemas de tubulações com espessuras de parede desnecessariamente elevadas ou perigosamente reduzidas.

Contudo o golpe de aríete é um fenômeno não muito fácil de se compreender intuitivamente, de modo que com os métodos tradicionais de cálculo, o profissional encontra, em geral, dificuldades para interpretá-lo corretamente. Somente com o aparecimento dos computadores é que o cálculo pôde ser automatizado, o que possibilitou a análise pormenorizada do golpe de aríete, mesmo nas condições de maior complexidade, tal como ocorre nos sistemas ramificados e malhados.

Com os recursos de processamento por computador atualmente existentes, o método considerado como o mais potente e versátil para a análise e resolução de problemas de golpe de aríete, é o método das características. No Brasil este método é recomendado para esta finalidade pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR-12215/1992, na elaboração de projetos de sistemas de adução de água. Consiste num procedimento computacional de cálculo, para resolução das equações diferenciais do movimento e da continuidade, sob a forma numérica e de modo sistematizado, suficientemente preciso para representar e prever o fenômeno.

A experiência de muitos anos de engenheiros, universidades e empresas, em hidráulica de tubulações, sendo que grande parte deste tempo com pesquisa e investigação sobre o golpe de aríete, com um universo incontável de trabalhos já realizados e publicados sobre este tema, habilita e credencia estes profissionais e entidades a oferecerem suporte técnico, para análise e estudos sobre este fenômeno, em projetos de sistemas hidráulicos que estejam em estudos, em desenvolvimento ou já executados, especialmente em adutoras de recalque.

Utilizando os recursos computacionais citados, os profissionais, especializados em hidráulica, estão capacitados a realizar estudos sobre o golpe de aríete, e a apresentar relatórios técnicos com os resultados de cálculos representando numericamente a evolução da vazão e da pressão, durante a ocorrência do fenômeno, ao longo de toda uma tubulação, de acordo com a variação do tempo, bem como a indicação das pressões máximas e mínimas previsíveis, levando em conta os componentes presentes no sistema, de modo a se determinar corretamente as classes de pressão necessárias para a tubulação, e/ou os tipos de dispositivos de proteção contra o golpe, mais adequados para toda a adutora.

4.3 CONDUTOS POR BOMBEAMENTO E POR GRAVIDADE

Por golpe de aríete se denominam as variações de pressão decorrentes de variações da vazão, motivadas por alguma perturbação, voluntária ou não, que se cause ao fluxo de líquidos no interior de condutos, sendo a intensidade do golpe proporcional à variação da vazão. Os casos mais frequentes ocorrem nas manobras de válvulas e nas paradas de bombas e turbinas hidráulicas.

No caso de condutos por gravidade, a manobra de válvulas (abertura ou fechamento) poderá ser determinada pela ação direta do operador, resultando, portanto, que a variação da vazão considerada, é uma variável sobre a qual se pode atuar.

Já em condutos por bombeamento, a parada de bombas motivada por interrupção da energia elétrica fornecida ao motor, salvo alterações do sistema, consiste de uma manobra não determinada diretamente pela ação do operador, mas pela própria natureza do sistema, resultando, portanto, que a variação da vazão neste caso, é uma variável sobre a qual não se pode atuar.

4.4 COMENTÁRIOS SOBRE A OCORRÊNCIA DE GOLPE DE ARÍETE EM SISTEMAS HIDRÁULICOS

Por golpe de aríete se denominam as variações de pressão decorrentes de variações da vazão, causadas por alguma alteração, voluntária ou involuntária, imposta ao fluxo de líquidos no interior de condutos. Isto quer dizer que o golpe de aríete ocorre quando se aumenta ou diminui a vazão, porém de uma maneira suficientemente rápida para que as forças elásticas do líquido e do conduto sejam mobilizadas, dando origem a ondas de pressão que se propagam ao longo do conduto.

Em condutos de recalque providos de válvulas de retenção logo após a bomba, e sem dispositivos de proteção contra o golpe, a situação de ocorrência do golpe de aríete de forma mais desfavorável, e que se verifica com mais frequência, é aquela decorrente da interrupção brusca do fornecimento de energia elétrica ao motor da bomba que alimenta o conduto. É nesta situação onde corriqueiramente se verificam valores extremos para o golpe.

No instante em que ocorre a interrupção, se inicia, devido à diminuição da rotação do motor, uma variação da pressão na coluna líquida, imediatamente a jusante da bomba, que se propaga na forma de onda até o final do conduto, onde se reflete e retrocede até a bomba. Encontrando a válvula de retenção fechada a pressão se eleva e reflete-se novamente para o final do conduto, e assim sucessivamente, ao mesmo tempo em que a amplitude destas ondas de pressão vão sendo gradativamente amortecidas devido ao atrito interno.

A celeridade é o parâmetro utilizado para caracterizar as propriedades de deformabilidade do conduto e compressibilidade do líquido que escoam no seu interior, durante as variações de pressão que ocorrem no golpe de aríete.

A inércia das massas girantes tem significativa influência na magnitude do golpe de aríete decorrente da interrupção do fornecimento de energia ao grupo moto bomba. O valor deste parâmetro, tanto para motores quanto para bombas, é fornecido pelos fabricantes destes equipamentos, em seus manuais.

A condição de operação da bomba é expressa por uma curva altura versus vazão, do tipo parábola, cujos coeficientes são obtidos por regressão a partir de dados fornecidos, também, pelos fabricantes dos equipamentos.

Já em condutos por gravidade sem dispositivos de proteção contra o fenômeno do golpe de aríete, a situação de ocorrência de forma mais desfavorável, é aquela decorrente da manobra de fechamento total rápido de válvula de seccionamento instalada no conduto.

4.5 DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO CONTRA O GOLPE DE ARÍETE

Um projeto cuidadoso de tubulação de recalque, deve incluir uma adequada investigação e especificação de equipamentos e dispositivos, com vistas a se evitar transientes indesejáveis.

Em alguns casos são especificadas tubulações com classes de pressão capazes de suportar as sobre pressões e depressões previstas. Porém estas variações de pressão na tubulação, submetem o material constitutivo do tubo a variações de tensões, que podem levá-lo à fadiga, o que não é recomendável para sua boa conservação. Portanto, um bom procedimento seria valer-se de algum tipo de proteção capaz de minimizar estas variações de pressão

Assim, uma vez calculado o golpe de aríete, causado pela parada do grupo eletrobomba, já se pode analisar a conveniência e os meios de minimizá-lo.

A seleção de um ou vários dispositivos de proteção deverá resultar da análise de um número conveniente de alternativas que possibilitem eleger aquela de melhor resposta, considerando a eficiência, a economia, a natureza, a frequência de manutenção, etc.

Os dispositivos de proteção contra o golpe de aríete devem, portanto, ter por efeito limitar os valores da sobre pressão e da depressão. Alguns dispositivos utilizados para este fim são descritos nos tópicos que se seguem.

4.6 VOLANTES DE INÉRCIA

Os volantes de inércia são dispositivos que atuam na proteção contra as depressões, devido à influência do tempo de parada no golpe de aríete. Ao se incorporar um volante ao grupo moto bomba, sua inércia retardará a perda de rotações, aumentando o tempo de parada

do conjunto e, conseqüentemente, diminuirá a intensidade do golpe. Devido à diminuição da depressão máxima, somente de forma indireta as sobre pressões serão atenuadas com estes dispositivos.

Assim, com a incorporação adequada de volantes, qualquer instalação poderá resultar em manobra lenta.



Exitoso producto: A mediados de agosto, en la sede de ZF en Schweinfurt, la volante de inercia con dos masas llegó a la unidad número 10 millones de su línea de montaje.

4.7 VENTOSAS

As ventosas são, também, dispositivos que atuam na proteção contra as depressões, uma vez que permitem a entrada de ar na tubulação através de um orifício localizado na parte superior da ventosa, limitando o valor da depressão ao da pressão atmosférica. Entre os vários modelos existentes, um tipo comum é a ventosa com flutuador esférico.



4.8 RESERVATÓRIOS UNIDIRECIONAIS

Os reservatórios unidirecionais, inventado pelo engenheiro hidráulico americano John Parmakian, também são dispositivos que atuam na proteção contra as depressões, pois alimentam a linha de recalque quando a carga piezométrica nesta atingir valores inferiores ao do nível da água neste reservatório, evitando, desta forma, que a linha piezométrica cause vácuo na linha.

A interligação do reservatório unidirecional à tubulação de recalque deverá conter válvula de retenção para evitar o retorno do escoamento, e a recarga é feita através de um sistema do tipo torneira de boia.

Com a pressurização da linha, a água deslocará o flutuador para cima, em direção ao orifício de passagem do ar, mantendo-o fechado. Quando, decorrente do golpe de aríete na seção onde se encontra instalada a ventosa, a pressão cair, o nível da água descerá, movimentando o flutuador para baixo, abrindo o orifício e permitindo a entrada de uma quantidade de ar para a tubulação, que evitará a formação de vácuo, impedindo o colapso do conduto. Quando novamente a pressão aumentar, estando a ventosa instalada em ponto conveniente da linha, esta possibilitará também a saída do ar contido na tubulação, que deverá ser de maneira controlada para evitar sobre pressão.

As ventosas que controlam a velocidade de saída do ar são conhecidas como slow-closing, anti-slam ou de fechamento lento. Estas tem dimensionamento específico para cada aplicação, visando evitar a ocorrência de choque hidráulico proveniente da reaproximação da coluna líquida. Cada diâmetro de rede tem uma velocidade de aproximação adequada, variando conforme o material, espessura e regime de trabalho.

4.9 BY-PASS

O by-pass também é um dispositivo que atua na proteção contra as depressões. Seu funcionamento é idêntico ao do reservatório unidirecional, com a diferença apenas de que a referência será o nível da água do reservatório de alimentação da bomba, isto é, atuará quando a carga piezométrica na tubulação de recalque atingir valores inferiores ao do nível do reservatório de alimentação da bomba.



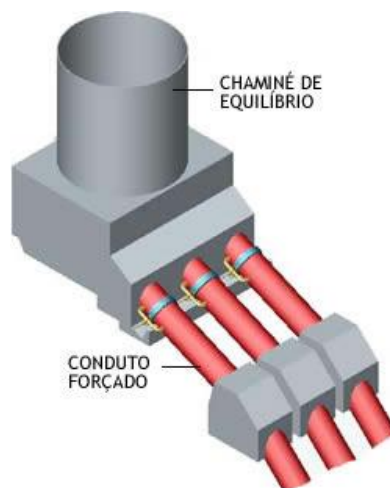
4.10 CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO

As chaminés de equilíbrio, ou stand pipes, são dispositivos que atuam, ao mesmo tempo, na proteção contra as depressões e contra as sobre pressões, visto que possibilitam a oscilação em massa da água entre a chaminé e o reservatório de descarga, evitando-se, neste trecho, a ocorrência de variações elevadas de pressões.

Com a parada do grupo moto bomba, e conseqüente redução da pressão na tubulação, o nível da água na chaminé (localizada próxima da válvula de retenção) desce, alimentando a linha de recalque, reduzindo a variação da vazão, e, com isto, reduzindo o valor da depressão. Em seguida, com a inversão do fluxo e fechamento da válvula de retenção, o nível da água sobe, transformando a energia cinética em potencial, e, assim, reduzindo o valor da sobre pressão.

Desta forma, com o afluxo e oscilação da água na chaminé, os efeitos do golpe de aríete entre esta e o reservatório são evitados. Portanto a chaminé de equilíbrio deverá estar tão próxima quanto possível da válvula de retenção. Deverá também ter tamanho adequado para não extravasar, a não ser que conte com vertedouro, e nem esvaziar para não permitir a entrada de ar na tubulação.

As chaminés simples são unidas, em sua parte inferior, sem estreitamentos, à tubulação de recalque. As chaminés com orifício possuem em sua parte inferior estreitamentos (estrangulamentos) que introduzem perdas de carga na passagem da água, contribuindo para que a carga em excesso seja dissipada, sendo, por isto, mais vantajosas que as simples. Eventualmente, além do orifício, poderia haver uma tubulação de união entre a chaminé e a tubulação de recalque. A chaminé de equilíbrio diferencial é uma associação das duas anteriores citadas.



4.11 COMENTÁRIOS SOBRE A CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

Tal como os reservatórios unidirecionais, as chaminés de equilíbrio põem a água em contato com a atmosfera. Portanto, em se tratando de água potável, cuidados devem ser tomados para evitar contaminação.

Ademais, fora as considerações de natureza construtiva e econômica, as chaminés de equilíbrio constituem dispositivos de elevada eficácia na proteção contra o golpe de aríete.

4.12 RESERVATÓRIOS HIDROPNEUMÁTICOS

Os reservatórios hidropneumáticos, como as chaminés de equilíbrio, são também dispositivos que atuam, ao mesmo tempo, na proteção contra as depressões e contra as sobrepressões, pois são recipientes fechados que contêm ar (ou gás) e água, e por isto, possibilitam a oscilação da massa de água entre este recipiente e o reservatório de descarga, com amortecimento, devido ao ar (ou gás), evitando que ocorra neste trecho, variações elevadas de pressões.

4.13 COMENTÁRIO SOBRE RESERVATÓRIOS HIDROPNEUMÁTICOS

Este tipo de dispositivo tem a desvantagem de sofrer perdas de ar por fugas ou dissolução na água. Assim, para repor a quantidade de ar perdida, a fim de manter o volume de ar requerido, torna-se necessária a utilização de compressores de ar, cuja frequência de uso, dependendo do porte da instalação, implicará custos que poderão ser decisivos na escolha destes dispositivos. O ar pode ser separado por uma membrana flexível ou por um pistão, resultando em custos que, da mesma forma, irão influenciar na decisão.

4.14 VÁLVULAS DE ALÍVIO

As válvulas de alívio são dispositivos que atuam na proteção contra as sobrepressões, pois, através de mecanismos de regulação, abrem-se quando a pressão excede a valores pré-fixados, permitindo a saída de uma quantidade de água até que a pressão caia abaixo do valor estabelecido, quando, então, fecham-se imediatamente. Desta forma, controlam o excesso de pressão, mantendo a pressão estabilizada.

Dado à pequena compressibilidade da água e ao curto tempo de ocorrência do golpe, é de se esperar que para estabilizar a pressão, a quantidade de água extravasada não seja importante.

O funcionamento destas válvulas é por meio de molas que acionam um tampão, ou através de mecanismos mais aperfeiçoados (válvulas compensadas) que conferem às mesmas maior precisão e eficácia.

Estes dispositivos, que devem ser instalados no trecho que se deseja proteger contra os efeitos da sobre pressão, devem abrir-se a uma pressão pré-fixada na ordem de aproximadamente 10% acima da pressão manométrica. Este número é um limite prático médio recomendado por diversos especialistas.

Uma característica importante requerida para estas válvulas é que tenham uma baixa inércia, de forma que possam abrir antes que a pressão estabelecida (pré-fixada) possa ser, em muito, excedida. Esta característica associada a um fechamento amortecido dará uma grande eficácia à válvula de alívio.

Cabe ainda ressaltar que a utilização destas válvulas requer um programa de manutenção cuidadoso e contínuo, e assim sendo, as válvulas de alívio podem vir a ser uma solução viável e bem econômica.



4.15 VÁLVULAS DE RETENÇÃO

As válvulas de retenção são dispositivos que, por servirem para impedir a inversão do fluxo num conduto, atuam na proteção contra as sobrepressões.

Um tipo muito comum de válvula de retenção é o de portinhola, a qual se move por um mecanismo de rotação em torno de um eixo horizontal situado em sua parte superior.

Há, no entanto, outros tipos de válvulas de retenção, onde se incluem as de alta tecnologia, cuja concepção permite que o fechamento seja lento e acabe um pouco antes da inversão, com o propósito de minorar a sobre pressão.

A portinhola abre-se com o próprio movimento da água e fecha-se quando cessa o movimento, de modo a impedir o retorno da coluna de água. Assim, se instaladas convenientemente em uma linha de recalque, isolam entre si trechos da tubulação, possibilitando que trechos situados em níveis inferiores fiquem aliviados das cargas dos trechos de níveis superiores. Com base neste princípio é que se instalam válvulas de retenção nas saídas das bombas, isolando-as da linha de recalque, pois a sobre pressão atua e tem o seu valor máximo exatamente até a válvula, ficando, por conseguinte, a bomba protegida. Isto pode ser aplicado em outros trechos da tubulação onde se queira proteger contra as sobre pressões.

Como não poderia deixar de ser, a utilização destas válvulas também requer uma manutenção cuidadosa e contínua, pois, como mostrado, fora as considerações de natureza

econômica, podem vir a ser uma solução satisfatória em muitos problemas de transientes indesejáveis.



4.16 OUTROS MEIOS DE PROTEÇÃO

O golpe de aríete é sempre proporcional à variação da velocidade, a qual varia com o inverso do quadrado do diâmetro. Desta forma, aumentos no diâmetro da tubulação trazem significativas reduções no golpe de aríete.

Redução do golpe também pode ser obtida reduzindo-se a celeridade. Então, tubulações com menores celeridades produzirão golpes de aríete com menor magnitude. Os tubos plásticos propiciam celeridades bem menores que os tubos metálicos e de fibrocimento, para uma mesma bitola e classe de pressão.

Por exemplo, numa tubulação de 2 500 m de comprimento, diâmetro nominal 150 mm, recalçando água a 34 m de altura, com vazão de 10 l/s, com a utilização de tubos de fibrocimento classe 20 (celeridade 960,86 m/s), o golpe (decorrente do corte súbito da energia fornecida ao motor) ultrapassa a marca dos 55 mca, enquanto que se se utilizasse tubos PVC também classe 20 (celeridade 346,95 m/s) o valor do golpe não chegaria a 19 mca, isto é, um terço do valor inicial, com a vantagem ainda, neste caso, da não ocorrência de vácuo e consequente dispensa do volante de inércia.

Outros aspectos, tais como comprimento da tubulação, rotação das bombas, etc., devem ser analisados

4.17 COMENTÁRIOS FINAIS

A adoção de dispositivos de proteção, como os aqui comentados, ou outros dispositivos controladores de fluxo e pressão, juntamente com os procedimentos operacionais, geralmente podem constituir meios de manter os efeitos dos transientes dentro de limites satisfatórios. Em algumas situações pode também se tornar interessante a combinação desses dispositivos. Por exemplo, se a adoção de uma chaminé de equilíbrio ou um reservatório hidropneumático vier a ser uma solução inviável, a associação de ventosas com válvulas de alívio poderá vir a ser uma opção favorável, visto que, juntas, atuam na proteção contra as sobre pressões e depressões.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao fim desse trabalho, vê-se que a hidrodinâmica se faz presente em, praticamente, todos aparelhos e máquinas presentes dentro de uma Praça de Máquinas.

Deve-se lembrar, também, a importância da aplicação dos conceitos da Mecânica dos Fluidos nos campos de construção naval ou plataformas, os quais buscam melhorar e aperfeiçoar os projetos de embarcações e quaisquer possíveis meios marítimos, para que estes possam trabalhar com ótimo rendimento e segurança para seus tripulantes.

Uma sólida formação em Mecânica dos fluidos é indispensável, uma vez que o Oficial de Máquinas desfruta de um contato diário com diferentes tipos de fluidos em diversas situações em seu ambiente de trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

WHITE, Frank M. **Mecânica dos Fluidos**. 6 ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

ASSY, Tufi Mamed. **Mecânica dos Fluidos – Fundamentos e Aplicações**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.