

GOLPE DE ARÍETE – TRANSIENTE HIDRÁULICO

01. INTRODUÇÃO:

Sempre que uma coluna líquida em movimento permanente, num conduto forçado, é acelerada ou retardada, a pressão, no sistema considerado, se modifica, havendo um aumento ou diminuição da mesma em relação ao valor inicial, correspondente ao valor da pressão do escoamento permanente.

Na Figura 01, adução por gravidade, o regime de escoamento permanente, para uma posição aberta do registro, fica estabelecido quando a soma das perdas de carga do sistema iguala ao desnível geométrico dado pela altura do reservatório em relação ao nível do registro, ou seja; $H_0 = \sum H_f$. Assim, a vazão Q através do sistema permanece constante, desde que nenhuma modificação ocorra no sistema. Ainda, em qualquer ponto do sistema, e em particular ao longo do comprimento L do conduto forçado, a pressão permanece constante, embora diferente de ponto a ponto.

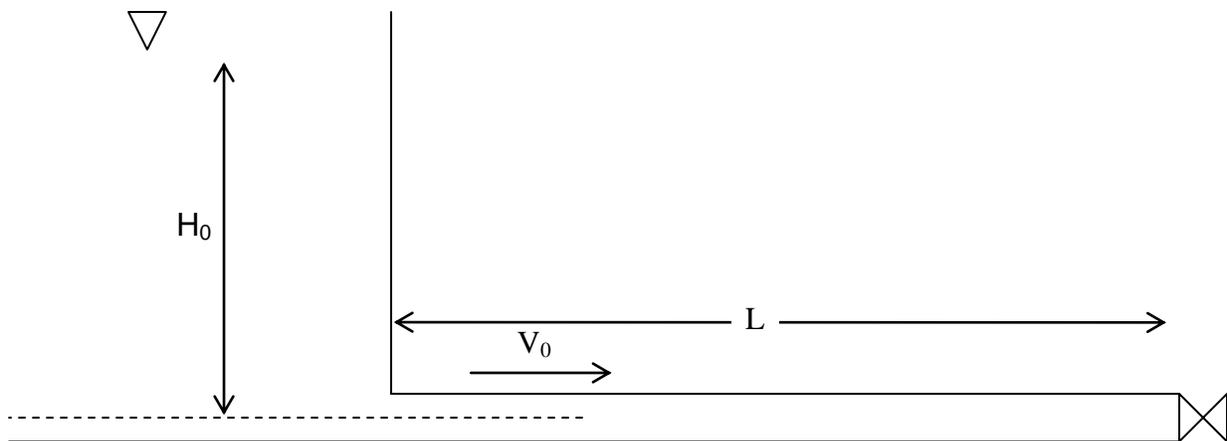


Figura 01. Escoamento em conduto forçado sob regime permanente

Entretanto, suponha-se a manobra de fechamento, parcial ou total do registro, trazendo, como conseqüência uma modificação no regime de escoamento, de

permanente a variado, com a coluna líquida sendo retardada. Simultaneamente, a variação da velocidade logo à montante do registro, aparece um aumento de pressão, de certo valor ΔH , ao mesmo tempo em que, em outros pontos do sistema, ocorrerão efeitos similares. Inversamente, se o registro está inicialmente fechado, com toda a coluna líquida em repouso, uma manobra de abertura do mesmo, colocará a massa líquida em escoamento, com aumento gradativo da velocidade. Logo à montante do registro, resulta uma variação da pressão, de certo valor ΔH , no caso, negativo em relação ao valor de antes da manobra.

Em instalações de bombeamento, seja quando da partida das bombas, seja quando da parada das mesmas, produz-se fenômeno semelhante de variação do escoamento com o tempo, com a massa líquida sendo acelerada no caso da partida, e retardada, no caso da parada da bomba. Como resultado, junto à bomba, surgem mudanças locais da pressão, de certo valor ΔH . (decrecente) no caso da parada da bomba, e de certo valor ΔH_+ (crescente), no caso da partida.

Ao fenômeno de variação da pressão ΔH_+ ou ΔH . que resultam, quer de manobras de fechamento ou de abertura de um registro, quer de manobras de partida ou de parada de uma bomba, dá-se o nome de “**golpe de aríete**”.

02. ASPECTOS CONCEITUAIS:

2.1. Celeridade (c): refere-se à velocidade com que a onda de pressão se desloca em uma tubulação. A velocidade de propagação da onda pode ser calculada através da

fórmula de Allievi, em que: $c = \frac{9900}{\sqrt{48,3+k\frac{D}{e}}}$, em que:

c: celeridade da onda de pressão (m/s);

D: diâmetro da tubulação (m);

e: espessura da tubulação (m);

k: coeficiente que leva em consideração o módulo de elasticidade do material.

Quadro 01. Valores do coeficiente k em função do material

Material	Valor de k	Material	Valor de k
Aço	0,5	Cimento-amianto	4,4
Ferro fundido	1,0	PVC	18,0
Concreto	5,0	Madeira	5,0

Obs.: para tubulações indeformáveis, tem-se que $k \rightarrow 0$. Dessa forma, a celeridade é de aproximadamente 1425 m.s^{-1} , valor este que corresponde à propagação do som na água. É interessante observar o que ocorre com a celeridade da onda, quando se reduz a relação entre D/e. Sugere-se construir um gráfico que relacione os valores de c (celeridade) e os valores de D/e para tubos de PVC ($k = 18,0$).

2.2. Período da tubulação (T): refere-se ao intervalo de tempo necessário para a onda de pressão percorrer o caminho de ida e volta, da válvula de retenção ao reservatório e deste à válvula de retenção.

03. MECANISMO DO FENÔMENO:

A canalização representada na Figura 02 está conduzindo água com uma certa velocidade. Considerando-se ao longo da massa líquida, várias porções, que serão designadas por lâminas, verifica-se o seguinte:

1. Com o fechamento do registro R, a lâmina 1 comprime-se e a sua energia de velocidade é convertida em energia de pressão, ocorrendo, simultaneamente, a distensão do tubo e esforços internos na lâmina (deformação elástica). O mesmo acontecerá em seguida com as lâminas 2, 3, 4, ...etc., propagando-se uma *onda de pressão* até a lâmina n junto ao reservatório.

2. A lâmina n , em seguida, devido aos esforços internos e à elasticidade do tubo, tende a sair da canalização em direção ao reservatório, com velocidade $-V$, o mesmo acontecendo sucessivamente com as lâminas $n - 1, n - 2, \dots, 4, 3, 2, 1$.

Enquanto isso, a lâmina 1 havia ficado com sobre-pressão durante o tempo

$$T = \frac{2L}{C},$$

sendo T chamada período da tubulação e C a velocidade de propagação da onda, geralmente denominada *celeridade*.

Há, então, essa tendência de a água sair da tubulação, pela extremidade superior. Como a extremidade inferior do tubo está fechada, haverá uma depressão interna. Nessas condições, $-V$ é convertida em uma onda de depressão.

3. Devido à depressão na canalização, a água tende a ocupá-la novamente, voltando as lâminas de encontro ao registro, dessa vez com a velocidade V . E assim por diante.

Nas considerações feitas, foi desprezado o atrito ao longo da tubulação, que, na prática, contribui para o amortecimento dos golpes sucessivos.

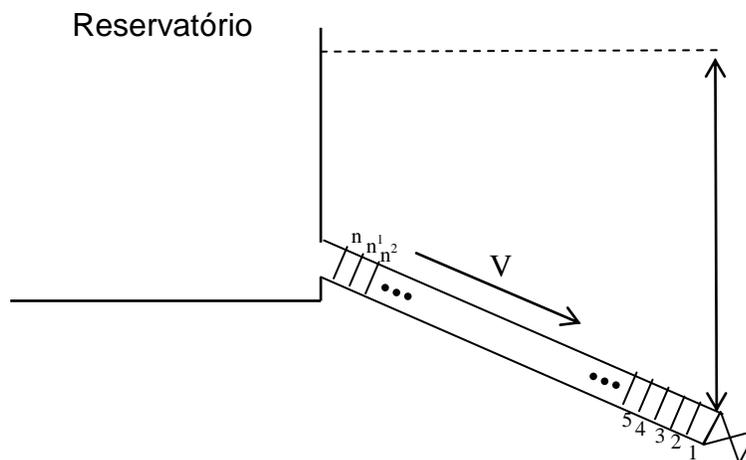


Figura 02. Ilustração do mecanismo do golpe de Aríete

04. DURAÇÃO DA MANOBRA DE FECHAMENTO DO REGISTRO

O tempo de fechamento do registro (RG) pode ser maior, igual ou menor que o tempo T , que é igual ao período da tubulação. Chamando de t , o tempo de fechamento de RG, as manobras podem ser classificadas em:

Manobra rápida: quando $t < T = 2L/C$., isto é, o tempo de fechamento é menor que o período da tubulação;

Manobra lenta: quando $t > T = 2L/C$., isto é, o tempo de fechamento do RG é maior que o período do conduto elástico.

05. O GOLPE NAS INSTALAÇÕES DE RECALQUE. OSCILAÇÕES DE PRESSÃO JUNTO À BOMBA, PRÓXIMO A UMA VÁLVULA DE RETENÇÃO.

O exemplo típico e considerado mais importante de golpe de aríete em instalações de bombeamento, com bombas acionadas por motores elétricos e instalações providas de válvulas de retenção logo à jusante das bombas, é o que se verifica logo após a interrupção do fornecimento da energia elétrica.

Na grande maioria dos casos, a inércia dos conjuntos rotativos dos grupos moto-bombas é muito pequena – quando comparada com a inércia necessária para manter a coluna líquida fluindo – e a velocidade das máquinas se reduz rapidamente, deixando de bombear para a tubulação de recalque. A coluna líquida continua a subir pela tubulação de recalque até que a força de inércia seja vencida pela ação da força gravitacional.

Na prática, interessa particularmente saber o que ocorre junto à bomba, próximo da válvula de retenção, logo após a parada da mesma.

A Figura 03 ilustra teoricamente, a oscilação da onda de pressão, junto à válvula de retenção (VR), numa instalação de bombeamento, considerando desprezível a perda de carga ao longo do conduto.

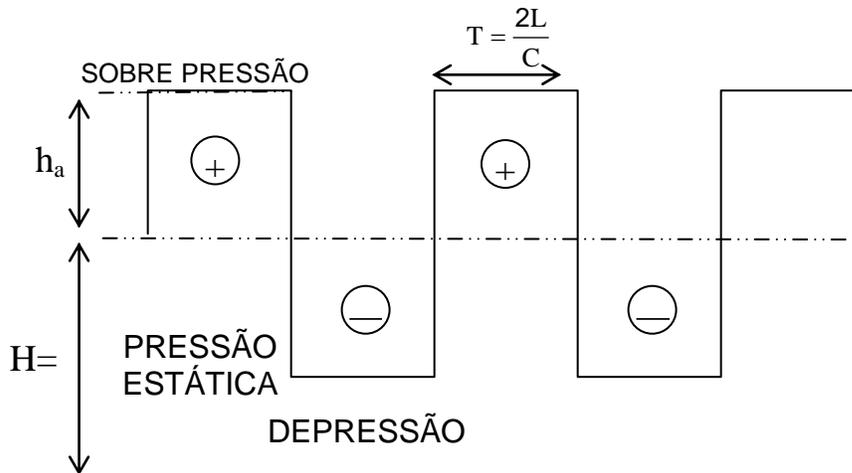


Figura 03. Ilustração teórica da variação da pressão junto à válvula de retenção.

Na prática, essa oscilação é deformada, principalmente pela ação da força de atrito existente ao longo do conduto, mas também pela própria manobra de fechamento da VR e da inércia do conjunto rotativo.

A Figura 04 ilustra uma manobra real de parada instantânea de uma moto-bomba com a oscilação de pressão sendo rapidamente amortecida.

1. Inicialmente, com a moto-bomba parada, o registrador marca a altura geométrica $H_g = 33,14\text{m}$, com vazão $Q=0$.

2. Logo em seguida, um aumento brusco da pressão, correspondendo à partida da bomba – necessidade de acelerar a coluna líquida de zero até a velocidade de escoamento permanente. Nessa fase, observam-se oscilações de pressão.

3. Após amortecimento da oscilação de pressão, devido a aceleração da massa líquida, o registrador assinala a leitura $H_B = 51,50\text{m}$, correspondente à altura manométrica do recalque.

4. Após a interrupção da energia elétrica, há uma queda brusca da pressão, correspondente à descompressão da coluna líquida, com a pressão atingindo o valor $H_{\min} \cong 3,00\text{m.c.a.}$

5. Imediatamente após, devido à ação da gravidade e a atuação da VR, a pressão eleva-se ao valor máximo, $H_{\text{máx}} \cong 78,0$ m.c.a.

6. O ciclo se repete, caindo rapidamente para $\Delta H \rightarrow$ zero, com a pressão assumindo o valor da altura geométrica $H_g = 33,14$ m.

Da Figura 04, obtém-se:

$$\Delta H_{\text{min}} \text{ em relação a HB} = 51,50\text{m} \therefore \Delta H_{\text{min}} = 51,50 - 3,00 = 48,5\text{m}$$

$$\Delta H_{\text{min}} \text{ em relação a Hg} = 33,14\text{m} \therefore \Delta H_{\text{min}} = 33,14 - 3,00 = 30,14\text{m}$$

$$\Delta H_{\text{max}} \text{ em relação a HB} = 51,50\text{m} \therefore \Delta H_{\text{max}} = 78,00 - 51,5 = 26,5\text{m}$$

$$\Delta H_{\text{max}} \text{ em relação a Hg} = 33,14\text{m} \therefore \Delta H_{\text{max}} = 78,00 - 33,14 = 44,8\text{m}$$

NOTA: pelo exemplo, fica evidente que as primeiras ondas de pressão, negativa e positiva, são as mais importantes a serem consideradas.

06. CÁLCULO DO GOLPE DE ARIETE EM INSTALAÇÕES DE RECALQUE

Os valores máximos dos golpes de aríete, tanto negativo quanto positivo, surgem logo após a variação da velocidade de escoamento, e são considerados iguais em valores absolutos.

EXEMPLO DE CÁLCULO

1. $Q = 800 \text{ m}^3/\text{h};$

Material = Ferro fundido (FoFo)

Diâmetro = 450 mm

$H_{\text{man}} = 65,19$ m.c.a.

$L_{\text{eq}} = 2800\text{m}$

2. Cálculo do tempo (Δt) de parada do escoamento, conforme Mendiluce. O valor do tempo Δt é obtido através de fórmulas experimentais ou empíricas. Uma das fórmulas mais usadas é a fórmula empírica de Mendiluce.

$$\Delta t = 1 + \frac{K \cdot L \cdot V}{g \cdot H_{\text{man}}}$$

sendo:

L : comprimento do conduto em m;

V : velocidade do escoamento permanente em m/s;

H_m : altura manométrica da bomba, em m.c.a.;

K : um coeficiente, tal que:

$$K = 2, \text{ quando } L < 500\text{m}$$

$$K = 1,5, \text{ quando } 500 < L < 1500\text{m}$$

$$K = 1,0, \text{ quando } L > 1500\text{m}$$

No exemplo, tem-se portanto K = 1,0; pois L > 1.500m;

$$V = 1,4 \text{ m/s};$$

$$\Delta t = 1 + \frac{1,0 \cdot 2.800 \cdot 1,4}{9,81 \cdot 65,19} \therefore \Delta t = 7,1 \text{ seg.}$$

3. Escolha da fórmula a ser adotada fica na dependência do cálculo de $c \cdot \frac{\Delta t}{2}$ e de sua comparação com o valor de L = 2.800m. Escolhe-se a fórmula de MICHAUD quando o comprimento L vale:

$$L < c \cdot \frac{\Delta t}{2} \text{ (tubulações curtas)}$$

c → velocidade de propagação da onda (celeridade)

Escolhe-se a fórmula de ALLIEVI, quando:

$$L > c \cdot \frac{\Delta t}{2} \text{ (tubulações longas).}$$

Fica claro pela colocação acima que a classificação de instalações com tubulações curtas ou longas NÃO depende propriamente do comprimento de fato da tubulação, mas também do tempo Δt de parada do escoamento da celeridade.

a) cálculo do golpe segundo a fórmula de MICHAUD.

$$\text{MICHAUD} \rightarrow \Delta H = \frac{2LV}{g\Delta t}$$

b) cálculo do golpe segundo a formulação do escoamento elástico, também conhecida como fórmula de ALLIEVI.

$$\text{ALLIEVI} \rightarrow \Delta H = \frac{c.V}{g}$$

Cálculo da celeridade (c)

$$c = \frac{9.900}{\sqrt{48,3 + k \cdot \frac{D}{e}}} \quad \therefore c = \frac{9.900}{\sqrt{48,3 + 1,25 \cdot \frac{450}{9}}} \quad \therefore c = 940,5 \text{ m/s. Logo}$$

$$c \cdot \frac{\Delta t}{2} = \frac{950,5 \times 7,1}{2} = 3.338,8\text{m}$$

Como $c \cdot \frac{\Delta t}{2} > L$; a fórmula de Michaud será adotada.

4. Tempo de propagação da onda (T)

$$T = \frac{2L}{c} = \frac{2 \times 2.800}{940,5} = 5,95 \text{ seg.}$$

Considerando que o fechamento completo da válvula de retenção, só ocorre depois de decorridos Δt seg., então a propagação das ondas, de pressão e velocidade criadas junto à bomba, após a parada desta, terá uma relação:

$$Z = \frac{\Delta t}{T} = \frac{7,1}{5,95} = 1,19 \text{ vezes.}$$

Conclui-se portanto, tratar-se de uma manobra lenta de fechamento da válvula, associado ao valor de Δt de Mendiluce.

5. Cálculo da depressão ($\Delta H -$) e da sobre-pressão ($\Delta H +$)

$$|\Delta H +| = |\Delta H -| = \frac{2 \cdot L \cdot V}{g \cdot \Delta t} = \frac{2 \times 2.800 \times 1,4}{9,81 \times 7,1}$$

$$|\Delta H +| = |\Delta H -| = 112,5\text{m}$$

$$\text{Pressão máxima} = H_g + |\Delta H +| = 55,0 + 112,5 = 167,5\text{m}$$

$$\text{Pressão mínima} = H_g - |\Delta H -| = 55,0 - 112,5 = -57,5\text{m}$$

Obs: Na condição de pressão mínima, tem-se $P_{\text{abs}} = 10,33 + (-57,5) = -47,17\text{m}$.

$$\text{Para água a } 20^\circ\text{C, tem-se: } \frac{P \cdot V}{\gamma} \cong 0,24\text{m.c.a. } P.V. (\text{kgf/cm}^2) = 0,024.$$

Conclui-se, portanto, que se atingiu à pressão de vapor, com rompimento da coluna líquida face à passagem da água para forma de vapor. Medidas de caráter preventivo deverão ser adotadas.