ESCOAMENTO TRANSITÓRIO
EM CONDUTO FORÇADO.

GOLPE DE ARÍETE

*Podalyro Amaral de Souza **

1. Caracterização do Fenômeno

Escoamento transitório em conduto forçado é o escoamento que tem suas variáveis de mérito, como pressão e velocidade, ou carga e vazão, dependentes da variável independente tempo. O termo transitório, neste contexto, também significa uma situação que interliga duas situações permanentes.

Um transitório hidráulico em conduto forçado é caracterizado pela ocorrência de ondas de pressão que se propagam ao longo da tubulação sempre que, por alguma razão, o escoamento sofrer aceleração ou desaceleração.

A segunda lei de Newton, que em seu enunciado mais simples diz: **força é o produto da massa pela aceleração**, garante o surgimento de força e, em decorrência, o surgimento de variação de pressão, sempre que a massa de fluido em escoamento seja acelerada ou desacelerada.

As ondas de pressão propagam-se ao longo da tubulação, sofrem reflexões nas extremidades, mudam as amplitudes de positivas para negativas e vice versa.

O termo **Golpe de Aríete** foi forjado pelos pesquisadores franceses, que assimilaram o som rítmico produzido pelas sucessivas ondas de pressão que atingiam um registro de gaveta ao som das batidas de um **aríete** ao arrombar portas e muralhas de fortificações. O **aríete** é uma antiga máquina de guerra, usada até o século XV, consistindo basicamente de um tronco de madeira pendurado em um pórtico; o tronco, impulsionado por vários soldados, era arremetido seguidas vezes contra a porta ou muralha a ser arrombada.

A palavra **aríete** é de origem latina, **aries, arietis**, que significa carneiro.

A abertura e o fechamento de válvula, a partida ou a parada de bomba, a abertura e o fechamento de distribuidor de turbina, ou mesmo o rompimento de um ponto de tubulação estão entre as principais causas do Golpe de Aríete.

Uma aplicação positiva do fenômeno do Golpe de Aríete, talvez a única, é o dispositivo denominado **Carneiro Hidráulico**, muito usado em propriedades rurais para recalcar água.

Os efeitos danosos do Golpe de Aríete, infelizmente, são mais numerosos: rompimento de tubulação por excesso de pressão, implosão de tubulação por diminuição de pressão (separação da coluna líquida), rotação reversa de bomba, com risco de queima do motor elétrico, disparo de turbina, com risco de grave acidente por rompimento do rotor, rompimento da tubulação por fadiga, pela ocorrência de um elevado número de solicitações periódicas de alta freqüência.

2. Grandezas Físicas

No estudo do Golpe de Aríete as variáveis dependentes, ou variáveis de mérito, podem ser **a pressão “p” e a velocidade média “V”**, que são as grandezas com as quais preferem trabalhar os engenheiros da área mecânica, ou, alternativamente, **a carga “H” e a vazão “Q”**, que são as preferidas dos engenheiros da área civil.

As variáveis independentes são sempre **a posição “x”**, medida ao longo do eixo do tubo, e **o tempo “t”**, sempre com origem a partir do início da manobra que produziu o transitório.

Os parâmetros de interesse para o estudo do Golpe de Aríete são: **o diâmetro interno do tubo “D”, a espessura da parede do tubo “e”, o comprimento “L” e a duração da manobra “q”.**

As propriedades físicas envolvidas são: **a massa específica “r”, o módulo de elasticidade volumétrica do líquido “K” e o módulo de elasticidade linear do material do tubo “E”.**

3. Celeridade de Propagação de Onda Elástica

A onda de pressão, característica do Golpe de Aríete, é uma onda do tipo elástica, com celeridade de propagação expressa em termos das propriedades físicas citadas, do diâmetro interno do tubo e da espessura da parede, cuja expressão analítica é

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{r}}}{\sqrt{1+\frac{KD}{Ee}}} \quad \text{...(1)}$$

Apesar de ser uma expressão que envolve as propriedades físicas do tubo e do fluido, e os parâmetros geométricos do tubo, a celeridade de onda elástica é, em si, uma propriedade física, não dependendo portanto das condições do escoamento, ou melhor, das variáveis pressão e velocidade e das variáveis independentes posição e tempo.

O numerador da Eq.(1), $\sqrt{K/r}$, representa fisicamente a celeridade de onda elástica (velocidade do som) no meio fluido considerado infinito, isto é, sem fronteiras. Como exemplo, pode-se estimar a velocidade do som na atmosfera tomando-se para o ar K=1,38x10^5Pa e r =1,2 kg/m^3 , obtendo--se a=339,11m/s.

O denominador $\sqrt{1+KD/(Ee)}$, que modifica a celeridade em meio infinito, diminuindo-a, representa o efeito do confinamento da propagação da onda elástica num tubo também elástico.

Em um tubo considerado rígido a celeridade da onda elástica é a própria celeridade em meio infinito, o mesmo ocorrendo para tubo com parede muito espessa.

Nos projetos hidráulicos as velocidades médias dos escoamentos geralmente são menores que 5m/s, enquanto as celeridades de onda elástica podem assumir valores bem elevados como nos dois exemplos a seguir:

Exemplo 1, tubo de aço com escoamento de água:

- K=2,2 GPa (água)
- r =1000 kg/m^3 (água)
- E=206 GPa (aço)
- D=0,500 m
- e=0,005 m

Para estes dados a celeridade em meio infinito é a=1483,24m/s e a celeridade confinada ao tubo é a=1030,03m/s, o que mostra a rapidez com que se propagam as ondas elásticas.

Exemplo 2, tubo de PVC com escoamento de água:

- K=2,2 GPa (água)
- r =1000 kg/m^3 (água)
- E=2,6 GPa (PVC)
- D=0,027 m
- e=0,0025 m

A celeridade em meio infinito é a mesma do Exemplo 1, mas a celeridade confinada ao tubo, neste caso, fica a=465,83m/s.

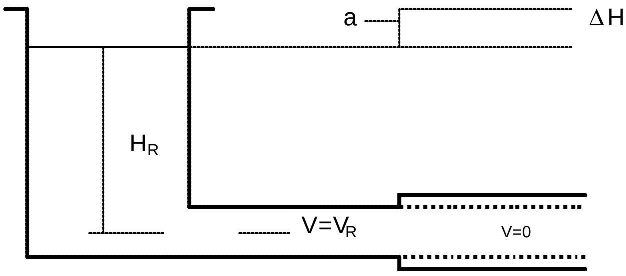
4. Classificação de Manobras

As manobras que ocasionam os transitórios hidráulicos, como as realizadas sobre uma válvula podem ser classificadas por comparação entre o tempo que dura a manobra “q” e o tempo necessário para uma onda elástica completar um percurso de ida e volta no tubo, “2L/a”.

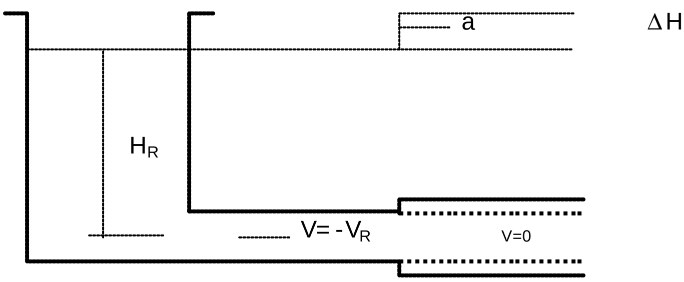
Se q < 2L/a, tem-se uma **manobra rápida.**
Se q ≥ 2L/a, tem-se uma **manobra lenta.**

5. Seqüência Ideal de Propagação

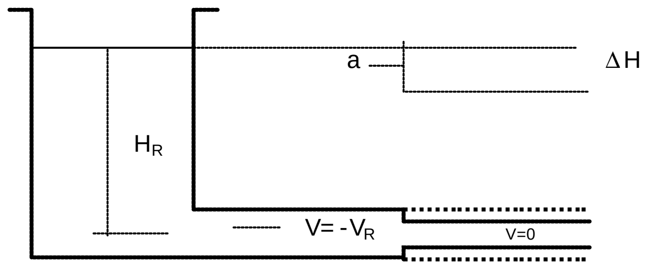
A seqüência ideal de propagação será mostrada a seguir, para um sistema hidráulico composto por um reservatório, um tubo e uma válvula (sistema RTV), onde não há perda de carga distribuída e nem perdas singulares. O transitório será o gerado pelo fechamento total e instantâneo da válvula na extremidade de jusante do sistema.



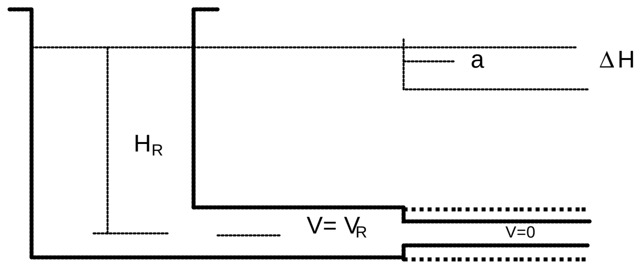
(a) $0 < t < L/a$



(b) $L/a < t < 2L/a$



(c) 2L/a < t < 3L/a



(d) 3L/a < t < 4L/a

Na figura (a) está esquematizado um instante da primeira fase da propagação da onda gerada pela fechamento total e instantâneo; esta fase termina quando a frente de onda alcança o reservatório, instante em que o tubo encontra-se totalmente dilatado pela ação da sobrecarga e com a velocidade nula ao longo de todo o tubo.

Na figura (b) está representado um instante da segunda fase que se inicia com o tubo totalmente dilatado fazendo com que este volte ao diâmetro nominal, devolvendo o excesso de água acumulado na primeira fase para o reservatório, estabelecendo um escoamento reverso, isto é, para o reservatório. Nesta fase há uma onda de descompressão propagando-se do reservatório para a válvula. O final desta segunda fase ocorre quando a onda de descompressão alcança a válvula, com todo o tubo com o diâmetro nominal, carga igual à carga inicial e com velocidade reversa de mesmo módulo da inicial.

A terceira fase, cujo instante genérico está representado na figura (c), começa produzindo, por efeito de inércia do escoamento, uma descompressão junto à válvula, reduzindo a velocidade a zero. A onda de descompressão caminha da válvula para o reservatório e termina esta terceira fase com o tubo submetido a uma carga menor que a carga inicial, com velocidade nula em todos os pontos e com um diâmetro inferior ao diâmetro nominal em todas as seções.

A última fase, a quarta, tem um instante genérico representado na figura (d). Partindo da condição final da terceira fase, o tubo reage para voltar ao diâmetro nominal. Esta reação inicia-se junto ao reservatório com o tubo admitindo água, estabelecendo um escoamento do reservatório para a válvula. Há o retorno ao diâmetro nominal e à carga inicial conforme a onda de compressão gerada caminha para a válvula. No final desta fase o escoamento e o tubo readquirem as condições anteriores ao início do fechamento, o que indica que o fenômeno é periódico e tem período 4L/a.

6. Modelo Matemático

O modelo matemático para o Golpe de Aríete requer, para o seu desenvolvimento, o uso de três princípios da Física e de pelo menos uma lei complementar.

Princípios da Física:

- Conservação de Massa
- Quantidade de Movimento
- Primeira Lei da Termodinâmica

Lei Complementar:

- Lei de Hooke (linear e volumétrica)

A aplicação do princípio da Conservação de Massa, levando em consideração a deformação volumétrica do fluido e a deformação linear do tubo, permite a obtenção de uma equação diferencial parcial onde se destaca a celeridade de propagação da onda elástica “a” cuja fórmula está na Eq.(1). Da aplicação do princípio da Quantidade de Movimento resulta uma segunda equação diferencial que não tem envolvimento com a celeridade “a”, mas na qual está presente uma parcela que leva em conta a perda de carga distribuída, o que provém do uso da Primeira Lei da Termodinâmica (Equação de Bernoulli).

As equações resultantes são:

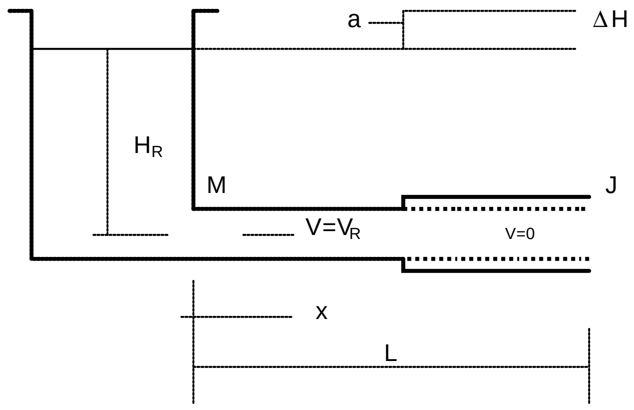
- Conservação de Massa

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA}\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \qquad ...(2)$$

- Quantidade de Movimento

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA}Q|Q| = 0 \qquad ...(3)$$

Solucionar um sistema com duas equações diferenciais parciais significa encontrar as duas funções incógnitas Q(x,t) e H(x,t). Para tanto é necessária a especificação de condições iniciais e de condições de contorno. Como exemplo pode-se especificar estas condições para um sistema simples do tipo reservatório-tubo-válvula (RTV), na ausência de perda de carga.



- Condições Iniciais (CI)

$H(x,0)=H_R$
$Q(x,0)=Q_R$

Observa-se que H_R é constante e que não há perda de carga distribuída.

- Condição de Contorno de Montante (CCM)

$H(0,t)=H_R$
$Q(0,t)$ é qualquer

- Condição de Contorno de Jusante (CCJ)

$$Q(L,t)=C_Q A_V \sqrt{2gH(L,t)}$$

É importante notar que nesta CCJ as duas variáveis de mérito estão especificadas através de uma única expressão que provém da aplicação de equação de Bernoulli.

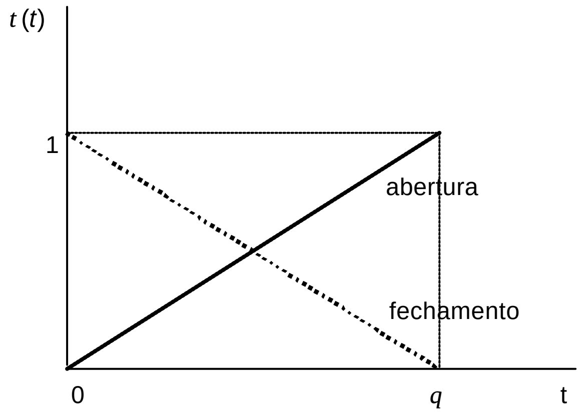
Neste ponto pode-se definir a **Lei de Manobra** que, para uma válvula com dispositivo automático de operação, deve ser especificada pelo fabricante. Para tanto divide-se membro a membro a equação que dá a CCJ pela mesma equação escrita para a condição de regime permanente, obtendo-se

$$\frac{Q(L,t)}{Q_R} = \frac{C_Q A_V}{(C_Q A_V)_R} \frac{\sqrt{2gH(L,t)}}{\sqrt{2gH_R}}$$

de onde se tira a definição de **Lei de Manobra:**

$$t(t) = \frac{C_Q A_V}{(C_Q A_V)_R} \qquad \text{com} \qquad 0 \le t(t) \le 1$$

O gráfico a seguir representa manobras lineares de abertura e fechamento



As Eqs.(2) e(3) são geralmente transformadas num sistema de equações características nas quais são baseados os métodos gráficos e os numéricos computacionais usados na prática da engenharia. As equações características obtidas das Eqs. (2) e (3) são:

$$\frac{dx}{dt} = +a$$
$$\frac{DQ}{Dt} + \frac{gA}{a}\frac{DH}{Dt} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \qquad \text{...(4)}$$

$$\frac{dx}{dt} = -a$$
$$\frac{DQ}{Dt} - \frac{gA}{a}\frac{DH}{Dt} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \qquad \text{...(5)}$$

onde $$\frac{DH}{Dt} = \frac{\partial H}{\partial t} \pm a\frac{\partial H}{\partial x}$$

$$\frac{DQ}{Dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} \pm a\frac{\partial Q}{\partial x}$$

7. Sobrecarga Máxima para uma Manobra de Fechamento Rápido

Considera-se um sistema do tipo RTV e um observador que, partindo do ponto M (reservatório) no instante L/a após o início do fechamento da válvula, caminha para a válvula (ponto J) com celeridade “a”. As condições hidráulicas registradas por esse observador na sua viagem de “M” para “J” satisfazem a Eq.(4), que na ausência de perda distribuída fica reduzida a

$$DQ + \frac{gA}{a}DH = 0$$

Esta equação pode ser integrada entre os instantes inicial e final, resultando em

$$(Q_f - Q_i) + \frac{gA}{a}(H_f - H_i) = 0$$

Como $(Q_f - Q_i) = -\Delta Q$ e $(H_f - H_i) = \Delta H$, pode-se escrever

$$\Delta H = \frac{a}{gA}\Delta Q$$ ou ainda

$$\Delta H = \frac{a}{g}\Delta V$$

Se a manobra rápida for de fechamento total obtém-se a expressão para a sobrecarga máxima fisicamente possível na forma:

$$\Delta H_{máx} = \frac{a}{g} V_R \qquad \text{...(6)}$$

Esta fórmula, bastante simples, é de grande valia para o engenheiro, por representar um limite máximo muito útil nas análises de projetos.

Apresenta-se a seguir uma aplicação desta fórmula para um sistema RTV, onde

- a=466 m/s (PVC, H_2O)
- g=9,81 m/s^2
- V_R=2,00 m/s

e obtém-se

$$\Delta H \cong 95 \, \text{m} \, H_2O$$

Se a classe de pressão do tubo de PVC for PN 750 kPa, o que eqüivale a 76,46 mH_2O, o tubo deverá romper por excesso de carga.

8. Métodos para Controle de Transientes

Controlar um transiente significa manter o valor da sobrecarga máxima, dado pela Eq.(6), o mais baixo possível. Isto pode ser obtido de duas maneiras:

1. Reduzindo-se o valor da velocidade média “V_R“ do regime permanente inicial.
2. Reduzindo-se o valor da celeridade “a” da onda elástica.

$$\Delta H_{máx} = \frac{a}{g} V_R$$

Como a celeridade da onda elástica é uma propriedade composta, pode-se averiguar os modos viáveis de se operar a redução de “a”. Para facilitar a análise repete-se aqui a Eq.(1).

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{r}}}{\sqrt{1 + \frac{KD}{Ee}}}$$

A redução de “a” pode ser obtida com:

a) A redução de “K”. Isto até é possível mas não é recomendável , pois a maneira de se obter redução do “K” é introduzindo-se bolhas de ar no escoamento líquido. As bolhas, por terem massa específica menor do que a do líquido, vão ficar acumuladas nos pontos altos da tubulação, criando outra sorte de problemas.
b) O aumento do diâmetro interno “D”.
c) A diminuição do módulo de elasticidade linear “E” do material do tubo. Isto é possível e implica na mudança da tubulação.
d) A diminuição da espessura “e” da parede do tubo. Isto também é possível e implica na mudança da tubulação.

Pode-se também evitar a ocorrência de altos valores de sobrecarga nas instalações hidráulicas se as válvulas forem operadas com durações de manobras suficientemente longas para que sempre sejam classificadas como lentas.

A prática da engenharia já consagrou alguns dispositivos que atuam com eficiência no controle de transitórios hidráulicos, dos quais os mais comuns estão indicados a seguir:

- Chaminé de Equilíbrio
- Tanque Alimentador Unidirecional
- Reservatório Hidropneumático
- Válvula Reguladora de Pressão
- Volante Acoplado à Bomba

9. Sobrecarga Máxima para Manobra Lenta Linear

Em se tratando de manobra lenta linear a sobrecarga máxima pode ser estimada de modo aproximado pela fórmula

$$\Delta H_{máx} = \frac{a}{g} V_R \left(\frac{2L}{aq} \right)$$

Esta fórmula é conhecida como **Fórmula de Michaud**. Pode-se facilmente notar que ela é obtida multiplicando-se a fração própria que está entre parênteses no segundo membro da Eq.(6), está válida para a sobrecarga máxima para fechamento total e instantâneo de uma válvula.

* *Engenheiro Civil, Prof. Assistente Doutor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Pesquisador do Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos – CTH (Convênio DAEE-USP).*