AVALIAÇÃO DO GOLPE DE ARIETE EM LINHAS DE RECALQUE

Eng.º ENIO TOURASSE (*)

1 — INTRODUÇAO

1.1 — Os sistemas elevatórios que tenham seu funcionamento interrompido pela falta de fornecimento de energia elétrica, ou mesmo pelo desligamento normal dos motores, estão sujeitos a golpes de ariete que poderão atingir valores elevados.

O objetivo do presente estudo é possibilitar que se reconheça, sem necessidade de uma análise completa, quais os casos em que podem ocorrer grandes elevações de pressão, e, quais aqueles em que se pode certamente assegurar um golpe de pequena magnitude e de valor conhecido. Para isso, torna-se necessário o conhecimento da curva característica de funcionamento da bomba, bem como do valor do momento de inércia dos rotores do motor e da bomba, cuja influência na paralização mais rápida ou mais lenta do sistema, é de fundamental importância.

Deve ficar claro, entretanto, que em um sistema onde sejam reconhecidas sobrepressões elevadas, torna-se necessário seu cálculo detalhado, de forma a permitir, se for o caso, a instalação de dispositivos que possam atenuar o golpe até valores compatíveis com a pressão de serviço da tubulação.

1.2 — Para o estudo, devem ser revistas as principais equações que permitem a determinação do golpe de ariete:

a) a variação da pressão é proporcional à variação de velocidade, ocasionada por uma causa perturbadora das condições normais de escoamento.

$$\Delta h = \frac{a\ \Delta v}{g} = \frac{a\ \Delta Q}{g\ S} \qquad (1)$$

Δh — variação da pressão

Δv — variação da velocidade

a — velocidade de propagação da onda de depressão ou de compressão

g — aceleração da gravidade

ΔQ — variação da vazão

S — seção transversal da tubulação

b) Equação de Allievi:

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

ρ — pêso específico da água

K — módulo de compressibilidade da água

E — módulo de elasticidade do material da tubulação

D — diâmetro do tubo

e — espessura da parede do tubo

A equação de Allievi pode ser escrita também:

$$a = \frac{9.900}{\sqrt{48.3 + k\ \frac{D}{e}}} \qquad (2),$$

onde $k = \frac{10^{10}}{E}$ (E em kg/m²), podendo-se tomar aproximadamente:

$k = 1.0$ — para tubos de ferro fundido

$k = 0.5$ — para tubos de aço

$k = 5.0$ — para tubos de concreto

(*) Engenheiro do Estado da Guanabara — Rio de Janeiro, outubro 1969.

O tempo que a onda leva para percorrer todo o encanamento e retornar ao ponto de origem, é comumente chamado de periodo da tubulação, e dado por:

$$T = \frac{2\ L}{a}$$

onde L é o comprimento do encanamento.

1.3 — No estudo, serão considerados dois tipos principais de linhas de recalque:

a) linhas aproximadamente retilíneas, sem grandes ondulações no plano vertical (fig. 1).

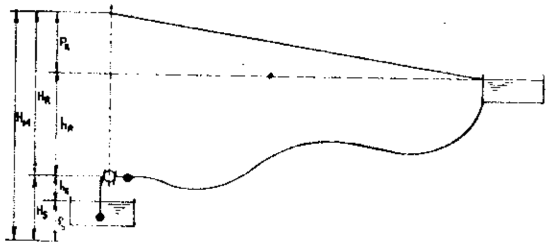

Fig. 1

b) linhas com ondulações no plano vertical (fig. 2).

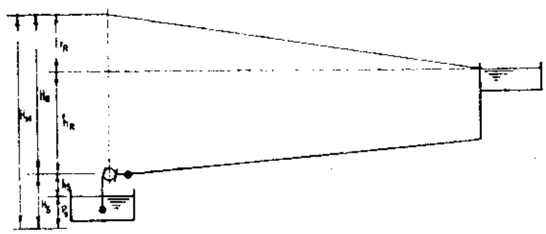

Fig. 2

As alturas indicadas nas figuras, são:

h_R — altura geométrica de recalque

h_S — altura geométrica de sucção

P_R — perda de carga no recalque

P_S — perda de carga na sucção

H_R — altura de recalque

H_S — altura de sucção

H_M — altura manométrica

Em ambos os casos, as bombas serão supostas instaladas normalmente, com válvula de retensão no recalque e válvula de pé na sucção; inicialmente, não será considerado qualquer dispositivo adicional para proteção contra o golpe de ariete.

O mesmo raciocínio desenvolvido para as bombas trabalhando com altura de aspiração, será válido para aquelas instaladas com carga positiva na entrada.

2 — LINHAS RETILINEAS

2.1 — Se a queda de altura de recalque, gerada pela bomba, ocorrer em um tempo menor do que o periodo da canalização, certamente haverá separação da coluna líquida, e o golpe de ariete poderá ser muito elevado.

Suponha-se a bomba funcionando com as características normais, H_M, Q_1 e n_1, no momento da paralização, onde:

H_M — vazão manométrica (m)

Q_1 — vazão (m^3/seg)

n_1 — número de rotações por segundo.

Após um período $T = \frac{2\ L}{a}$, o número de rotações passa de n_1 a n_2, conforme mostrado na figura 3.

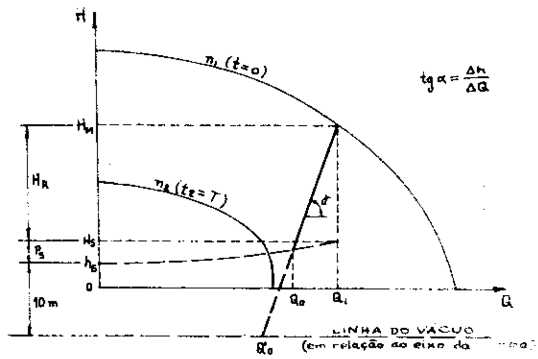

Fig. 3

Já se viu que a queda de pressão na tubulação, é:

$$\Delta H = \frac{a\ \Delta v}{g} = \frac{a\ \Delta Q}{g\ S}$$

No caso, $\Delta H = H_R + 10.0$ m e $\Delta Q = Q_1 - Q_0'$, pois como para a vazão Q_0 a altura de recalque gerada pela bomba é nula, sua tendência é ir diminuindo até Q_0' (onde a pressão absoluta é zero) *, havendo, então, a separação da coluna liquida.

* NOTA — O valor de 10.0 m tomado como correspondente a uma atmosfera, é aproximado; na realidade a separação ocorre ao ser atingida a tensão do vapor, para uma determinada temperatura da água

Para o cálculo do número de rotações em que a vazão atinge o valor Q_0, será suposto o diagrama da figura seguinte:

Tem-se:

$$\frac{Q_1}{Q_2} \simeq \frac{Q_m}{Q_0} = \frac{n_1}{n_2} \qquad \Delta Q = \frac{g\ S}{a}$$

$$\Delta H = \frac{g\ S}{a}\ (H_M - H_S) = \frac{g\ S}{a}\ H_R$$

mas,

$$\Delta Q = Q_1 - Q_0$$

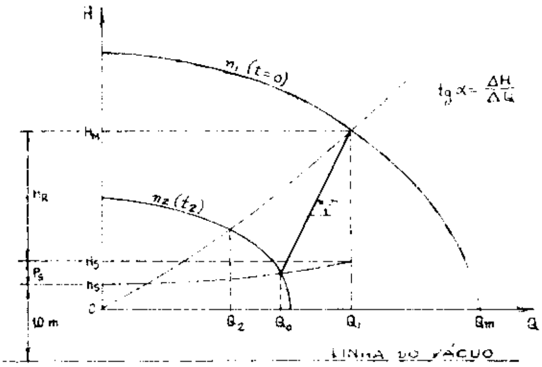

Fig. 4

Logo:

$$\frac{g\ S}{a}\ H_R = Q_1 - Q_0 = Q_1 - \frac{n_2}{n_1}\ Q_m,$$

e portanto:

$$n_2 = \frac{n_1}{Q_m}\left(Q_1 - \frac{g\ S\ H_R}{a}\right), \quad \text{ou:}$$

$$n_2 = n_1\ \frac{Q_1}{Q_m}\left(1 - \frac{g\ S\ H_R}{a\ Q_1}\right) \qquad (3)$$

Para determinar o tempo em que a velocidade para de n_1 a n_2, tem-se que a energia cinética desenvolvida pela bomba, é proporcional ao quadrado do número de rotações, enquanto a potência é proporcional ao cubo dêste número:

$$E_c = K_1\ n_1^2 \qquad (4)$$

$$P = K_2\ n_1^3 \qquad (5)$$

Num pequeno intervalo de tempo, dt, após o desligamento do motor, a variação de energia cinética será:

$$K_1\ [(n - dn)^2 - n^2],$$

e a potência média neste intervalo:

$$K_2\left(n - \frac{dn}{2}\right)^3$$

Como

$$dE_c = P\ dt,$$

vem:

$$dt = \frac{dE_c}{P} = \frac{K_1\ (n - dn)^2 - n^2}{K_2\ (n - dn/2)^3} \qquad (6)$$

Nas condições normais de funcionamento:

$$E_c = \frac{1}{2}\ \frac{I}{g}\ w_1^2$$

I — momento de inércia dos rotores do motor e da bomba (kg* m²)

w_1 — velocidade angular (rad./seg); $w_1 = 2\pi n_1$

$$\text{Portanto:}\quad E_c = \frac{g}{I}\ 2\ \pi^2\ n_1^2$$

Das equações (4) e (5), vem:

$$K_1 = \frac{I}{g}\ 2\ \pi^2 \qquad e \qquad K_2 = \frac{P}{n_1^3},$$

e a relação

$$K = \frac{K_1}{K_2} = \frac{2\ I\ \pi^2\ n_1^3}{P\ g},$$

ou, se a potência for tomada em HP:

$$K = \frac{2\ I\ \pi^2\ n_1^3}{75\ P\ g}$$

Desenvolvendo a equação (6), e desprezando os têrmos de infinitésimos maiores do que o primeiro grau:

$$dt = -2K\ \frac{dn}{n^2}$$

donde

$$t_2 = 2K \int_{n_1}^{n_2} - \frac{dn}{n^2}$$

$$t_2 = 2K\left(\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_1}\right) =$$

$$= \frac{2\ K}{n_1}\left(\frac{n_1}{n_2} - 1\right)$$

Logo:

$$t_2 = \frac{4\ I\ \pi^2\ n_1^2}{75\ P\ g} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) =$$

$$= \frac{I\ n_1^2}{18.7\ P} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right),$$

ou ainda, se n for tomado em rotações por minuto (RPM), como é usual:

$$t_2 = \frac{I\ n_1^2}{6.72 \times 10^4\ P} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \qquad (7)$$

Tem-se então: $t_2 < T$ haverá separação da coluna liquida, e como conseqüência um provável golpe de ariete de grande amplitude.

2.2 — Se a desaceleração da bomba for tal, que ainda resta uma altura de recalque quando a vazão atingir a zero, não haverá separação, e a maior pressão total após o golpe será menor do que duas vêzes a altura h_R.

O diagrama correspondente, será:

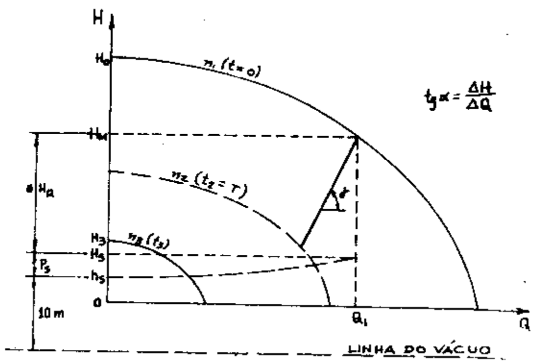

Fig. 5

H_0 — altura manométrica para a vazão zero, com n_1 rotações.

H_3 — altura manométrica para a vazão zero, com n_3 rotações (pode ser tomada pouco maior do que a altura geométrica de sucção, ou cêrca de 10% da altura de recalque).

Tem-se que:

$$\frac{n_3}{n_1} = \sqrt{\frac{H_3}{H_0}},$$

donde

$$n_3 = n_1 \sqrt{\frac{H_3}{H_0}},$$

e da equação (7):

$$t_3 = \frac{I\ n_1^2}{6.72\ 10^4\ P} \left(\frac{n_1}{n_3} - 1 \right)$$

Logo:

$$t_3 = \frac{I\ n_1^2}{6.72\ 10^4\ P} \left(\sqrt{\frac{H_0}{H_3}} - 1 \right) \qquad (8)$$

Para o cálculo do tempo em que a vazão se torna igual a zero, deve-se ter em vista que em cada período, a variação de vazão é:

$$2\ \Delta Q = 2\ \Delta H \frac{g\ S}{a};$$

para simplificar, pode-se fazer todos os ΔH iguais e com valor igual a H_R. Portanto, em um período, tem-se:

$$2\ \Delta Q = 2\ H_R \frac{g\ S}{a}$$

Chamando de Y ao número de períodos até a vazão chegar a zero, conclue-se que:

$$Y\ 2\ \Delta Q = Q,$$

donde

$$Q = Y\ 2\ H_R \frac{g\ S}{a}$$

Sendo

$$T = 2L/a,$$

vem para Y períodos:

$$t_0 = Y\ T = \frac{Q\ a}{2\ g\ S\ H_R} \frac{2\ L}{a},$$

ou, finalmente:

$$t_0 = \frac{L\ Q}{g\ S\ H_R} \qquad (9)$$

Portanto: se $t_3 > t_0$ não haverá separação, e a pressão total após o golpe será menor do que 2 h_R.

3 — LINHAS COM ONDULAÇÕES NO PLANO VERTICAL

A hipótese formulada no ítem 3.1 é válida para as linhas dêste tipo; entretanto, no caso do ítem 3.2, poderá ocorrer separação nos pontos altos do encanamento, com consequentes sobrepressões de grande valor, conforme esquematizado na figura 6.

H_A — pressão no ponto A (m)

ΔH — depressão máxima em A (m)

Se $\Delta H \geqslant H_A + 10.0$ m, haverá separação.

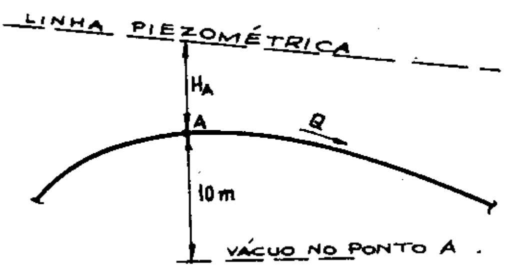

Fig. 6

Nestes casos, é necessário uma análise completa do sistema, para o cálculo do golpe de ariete.

4 — PROTEÇÃO DAS LINHAS

Vários dispositivos de proteção contra sobrepressões elevadas, podem ser instalados nas linhas de recalque, ou na própria bomba; assim é que podem ser utilizados volantes, câmaras de ar comprimido, reservatório de compensação, válvulas de descarga, ventosas, etc., além do recurso do aumento da espessura dos tubos.

Entretanto, no caso de linhas retilíneas e desenvolvendo-se aproximadamente no plano horizontal, a simples instalação de um «by-pass» entre o reservatório de sucção e o trecho de recalque (figura 7), impede a separação da coluna líquida no caso em que $t_2 < T$ (ítem 3.1).

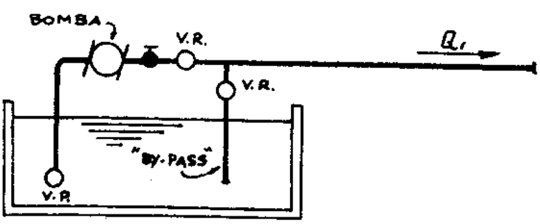

Fig. 7

Logo que a pressão próximo à bomba tende a cair abaixo da atmosférica, há penetração de água pelo «by-pass», impedindo o vácuo naquele ponto.

Para não haver separação em outros pontos da linha, é necessário que: $H_B + 10.0$ m $>$ $> H_R + P_{bp} + h_S$, conforme indicado na figura 8.

H_B — presão no ponto B (m)

H_R — altura de recalque (m)

P_{bp} — perda de carga no «by-pass» (m)

h_S — altura geométrica de sucção (m)

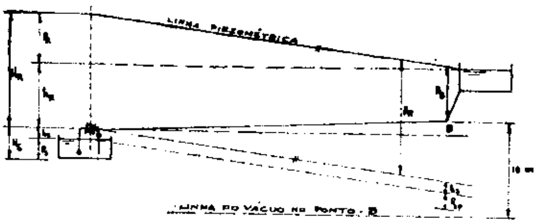

Fig. 8

A pressão máxima, neste caso, será também cêrca de 2 h_R.

5 — EXEMPLO

Seja verificar o sistema indicado na figura 9:

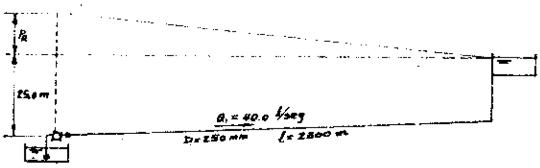

Fig. 9

L = 2.300 m	H_S = 2.9 m
D = 250 mm	h_R = 25.0 m
Q_1 = 40 l/seg	J = 4.63 m/km

A perda de carga no recalque, será:

$$h = J\,L = 4.63 \times 2.3 = 10.6 \text{ m},$$

e portanto:

$$H_R = 25.0 + 10.6 = 35.6 \text{ m}$$
$$H_M = 35.6 + 2.9 = 38.5 \text{ m}$$

A eletrobomba adotada apresenta as seguintes características:

n_1 = 1780 RPM, para corrente de 60 ciclos/seg

P = 25 HP

I = 2.1 kg* . m

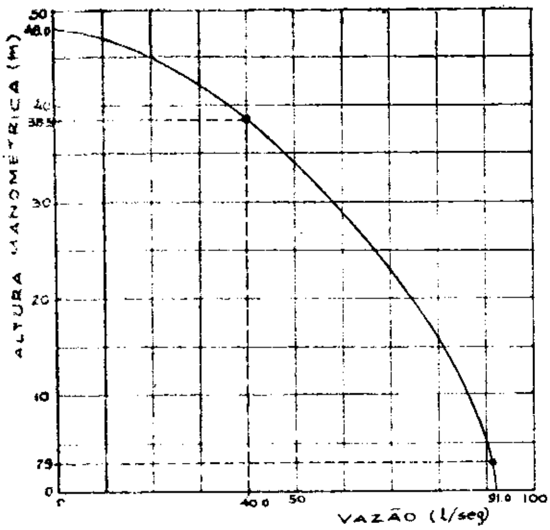

Fig. 10

Se o conduto utilizado é de ferro fundido, classe LA, vem para a velocidade da onda:

$$a = \frac{9.900}{\sqrt{48.3 + k\ D/e}} =$$

$$\frac{9\ 900}{\sqrt{48.3 + 1.0 \times 250/10}} = 1\ 160 \text{ m/seg}$$

O período será:

$$T = \frac{2\ L}{a} = \frac{2 \times 23.000}{1\ 160} = 4.0 \text{ seg}$$

Em seguida calcula-se n_2 e t_2 (equações (3) e (7)):

$$n_2 = 1780\ \frac{40}{91}\left(1 - \frac{9.8 \times 0.049 \times 35.6}{1.160 \times 40}\right) =$$

$$= 782 \text{ RPM}$$

$$t_2 = \frac{2.1 \times (1780)^2}{6.72 \times 10^4 \times 25}\left(\frac{1780}{782} - 1\right) =$$

$$= 5.1 \text{ seg}$$

Logo: $t_2 > T$, e está verificada a primeira condição.

Resta saber se ainda existe uma altura de recalque quando a vazão atingir a zero; para isso torna-se necessário calcular os valores de t_3 e de t_0 (equações (8) e (9)).

$$t_3 = \frac{2.1 \times (1780)^2}{6.72 \times 10^4 \times 25}\left(\sqrt{\frac{48.0}{3.6}} - 1\right) =$$

$$= 10.5 \text{ seg}$$

$$t_0 = \frac{2.300 \times 40 \times 10^{-3}}{9.8 \times 0.049 \times 35.6} = 5.4 \text{ seg}$$

Como $t_3 > t_0$, a pressão máxima após o golpe será de aproximadamente:

$$2\ h_R = 2 \times 25.0 = 50.0 \text{ m}$$