

GOLPE DE ARIETE EM LINHAS DE RECALQUE

ENG.º EDUARDO GOMES DOS REIS (*)

Este trabalho tem por finalidade estudar o fenômeno do golpe de ariete, analisando o gráfico de uma experiência feita pela «Light» na Adutora de Santo Amaro, no dia 3 de Maio de 1946. É importante notar que naquela ocasião, não havia aparelhos anti-golpe protegendo a adutora, mas apenas algumas «ventosas» para descarga de ar. Para melhor exposição, vamos dividi-lo em duas partes:

I — PARTE TEÓRICA

O golpe de ariete se manifesta no fechamento repentino ou gradativo da válvula ou registro de uma canalização, cujo conteúdo está animado de velocidade. Como consequência haverá aumento de pressão sobre a válvula ou registro, que dependerá do tempo de fechamento e da velocidade estancada.

Como se sabe, o golpe será máximo quando o fechamento for instantâneo, e considerado nulo quando o tempo de fechamento for demasiadamente longo.

Portanto, o cálculo da intensidade do golpe de ariete implica no conhecimento prévio do tempo de fechamento e da velocidade da corrente; elementos esses desconhecidos nas linhas de recalque, em virtude do golpe se dar em sentido contrário ao do movimento normal do líquido.

Quando se corta o fornecimento de energia elétrica ao motor de uma bomba de recalque, a coluna líquida, animada de velocidade, continua em ascensão até o ponto em que a sua inércia é vencida pela ação da gravidade. Portanto, a secção superior da coluna continua a percorrer certa distância teórica, a partir do instante em que houve o corte de energia.

Para melhor compreensão, podemos admitir que a partir desse instante, a canalização se prolongue com a mesma declividade, além do nível máximo de recalque.

Vejam agora o que se passa com a secção inferior da tubulação, durante o período chamado de inércia.

Cortado o fornecimento de energia, após curto espaço de tempo, que depende da inércia do conjunto motor bomba, haverá fechamento da válvula de retenção, em virtude da pressão existente na coluna líquida.

Como ponto básico deste estudo, admitiremos aquela válvula em perfeitas condições de funcionamento, como se recomenda na prática.

A pressão reinante na coluna líquida junto à válvula de retenção no instante em que houve o corte de energia, é igual à pressão estática acrescida da pressão equivalente à perda de carga necessária para a vazão de recalque.

Como se sabe, a soma dessas duas pressões, constitui a pressão manométrica. Portanto, após o corte de energia, a coluna líquida continua em ascensão, descomprimindo o líquido a juzante da válvula.

Terminada a fase de descompressão, se a inércia ainda for suficiente, haverá sucção, ocasionando entrada de água na adutora, através da válvula de retenção, que se manterá suficientemente aberta até terminar a fase de ascensão.

Se, a adutora possuir «ventosas», durante a fase de sucção poderá haver entrada de ar na canalização, como veremos mais adiante.

No momento em que cessar a ação da inércia, a coluna líquida tende a voltar, havendo nesse instante o fechamento da válvula de retenção, ocasionando o golpe de ariete. Naturalmente, se a válvula não se fechar imediatamente após terminada a ação da inércia, haverá uma corrente de retorno, que causará por ocasião do fechamento, um golpe de ariete de intensidade muito maior, e proporcional à sua velocidade.

(*) Engenheiro Assessor da Diretoria de Obras da SAEC.

Portanto, terminada a ação da inércia, a coluna líquida cai sobre a válvula de retenção, com queda de altura zero, ocasionando o golpe de ariete, cuja intensidade seria exatamente o dôbro da altura estática se não houvesse o atrito do líquido contra a tubulação. Estamos desprezando a pequenina corrente de retôrno ocasionada pelo deslocamento da válvula ao se fechar.

Esse fenômeno é semelhante ao de um corpo que cai sobre outro, de altura nula; cuja pressão na secção de contato será duas vezes maior do que aquela que se verificaria se o acréscimo de carga devido ao pêso do corpo crescesse gradativamente, de zero até o seu valor final. Mas essa queda de altura zero não é instantânea, havendo uma infinidade de quedas de moléculas, umas sobre as outras do início ao fim da canalização, ou no caso de um corpo sólido, da secção de contato até a secção superior. Evidentemente, o tempo da sua duração será o mesmo que levará a onda de choque para percorrer tôda a extensão da coluna líquida, ou do corpo considerado.

Baseados nesse raciocínio, vamos examinar o fenômeno do golpe de ariete observado na Adutora de Santo Amaro, cujo gráfico acompanha este trabalho.

II — PARTE PRÁTICA

A adutora em questão constava de um trecho inicial, aproximadamente em nível, e de um trecho final em aclave. As características desses trechos são as seguintes:

Trecho inicial — 0,97 m de diâmetro interno, 11/16" de espessura, 2.540 m de comprimento, em aço doce.

Trecho final — 1,50 m de diâmetro interno, 0,026 m de espessura média, 3.060 m de comprimento, em ferro fundido.

Outras características: Bomba «afogada», 37,12 m de altura de recalque em 3 de Maio de 1946, pressão manométrica equivalente a 46,67 metros de coluna de água, e a intensidade do primeiro golpe igual a 71,67 m.c.a. O zero do aparelho registrador da experiência foi regulado para o nível da represa de Guarapiranga nesse dia; portanto o gráfico obtido indica o desenvolvimento do fenômeno acima desse nível.

Sendo $E_a = 20.700 \text{ kg/cm}^2$ o módulo de elasticidade longitudinal da água, $E_s = 2,2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ o módulo do aço, e $E_f = 10^6 \text{ kg/cm}^2$ o módulo do ferro fundido, uma dada pressão uni-

tária P provoca a seguinte deformação longitudinal na coluna líquida, cujo comprimento é igual a L .

$$\lambda = \frac{PL}{Ea} \quad (1)$$

No tubo, de espessura igual a e , admitido como envoltório de pequena espessura, a pressão P provoca a seguinte deformação diametral

$$2e\sigma = DP \therefore \sigma = \frac{DP}{2e}$$

sendo D o diâmetro interno do tubo. O diâmetro D_1 do tubo deformado será

$$\pi D_1 = \pi D + \frac{\sigma \pi D}{E_t} \therefore D_1 = D + \frac{D^2 P}{2e E_t}$$

Esse aumento do diâmetro interno ocasiona um encurtamento da coluna líquida, equivalente a:

$$\lambda' = L \left(1 - \frac{D^2}{D_1^2} \right) \quad (2)$$

Essas duas deformações evidentemente são teóricas, e equivalem ao encurtamento que sofreria a coluna líquida descomprimida, se em dado momento lhe fôsse aplicada a pressão P .

Partindo do princípio que a queda de altura nula ocasiona na parte inferior da coluna uma pressão igual a duas vezes a pressão estática, sendo h a diferença de nível entre os seus extremos, e L o seu comprimento, o encurtamento devido à pressão $2P$, admitindo-se a tubulação indeformável, será

$$\lambda = \frac{PL}{Ea}$$

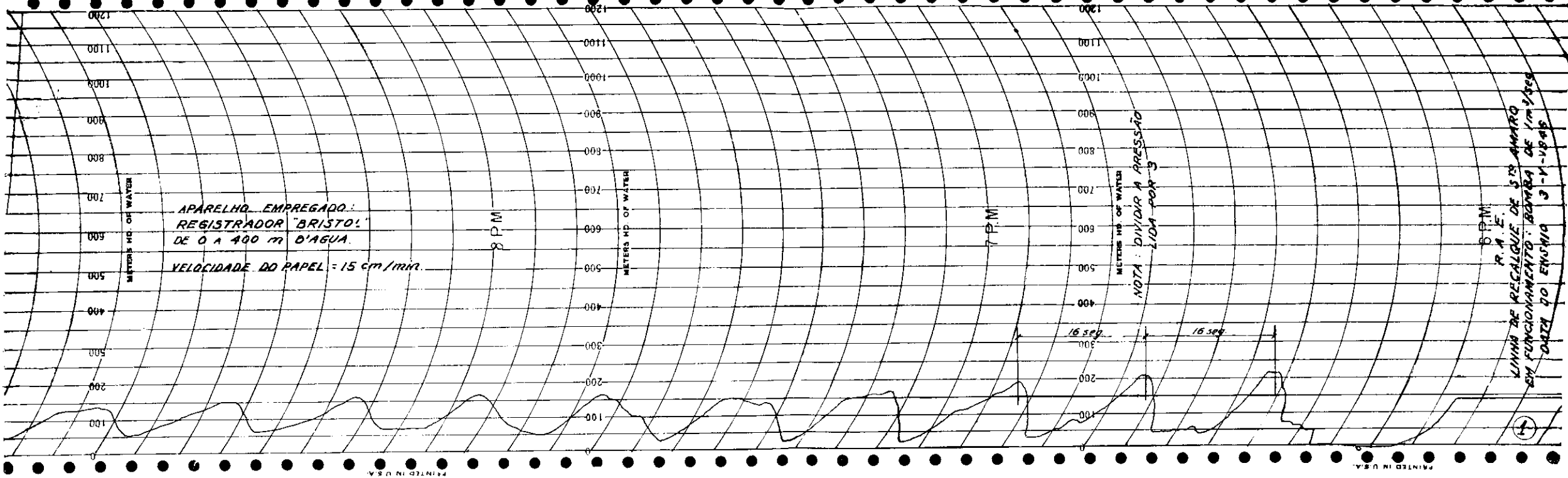
Sendo V_m a velocidade média de deformação longitudinal da coluna líquida, t o tempo de percurso da onda de choque, e a a sua velocidade, temos

$$V_m = \frac{\lambda}{t}, \text{ mas } t = \frac{L}{a}, \text{ logo}$$

$$V_m = \frac{\lambda a}{L}$$

e ainda

$$V_m = \frac{Pa}{Ea}$$



PERFIL ESQUEMÁTICO DA LINHA DE RECALQUE DE SANTO AMARO (ADUTORA ANTIGA)

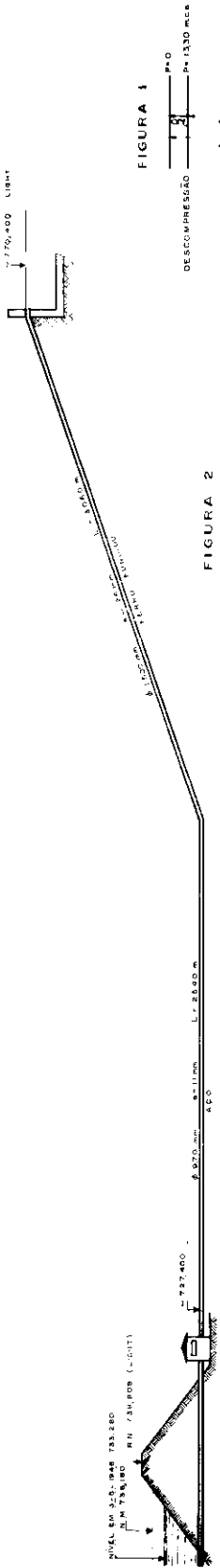


FIGURA 1

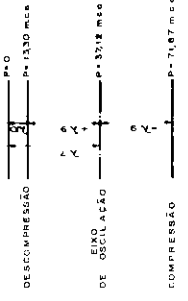


FIGURA 2



GRÁFICO RETIFICADO DO GOLPE DE ARIETE

PRESSÃO MANOMÉTRICA : 46,87 m.c.a.
 PERDA DE CARGA : 9,55 m.c.a.
 ALTURA DE RECALQUE : 37,12 m
 PRIMEIRO GOLPE : 71,87 m.c.a.
 PERDAS DE CARGA
 1º GOLPE : 74,24 - 71,87 = 2,37 m
 2º GOLPE : 74,24 - 69,00 = 5,24 m

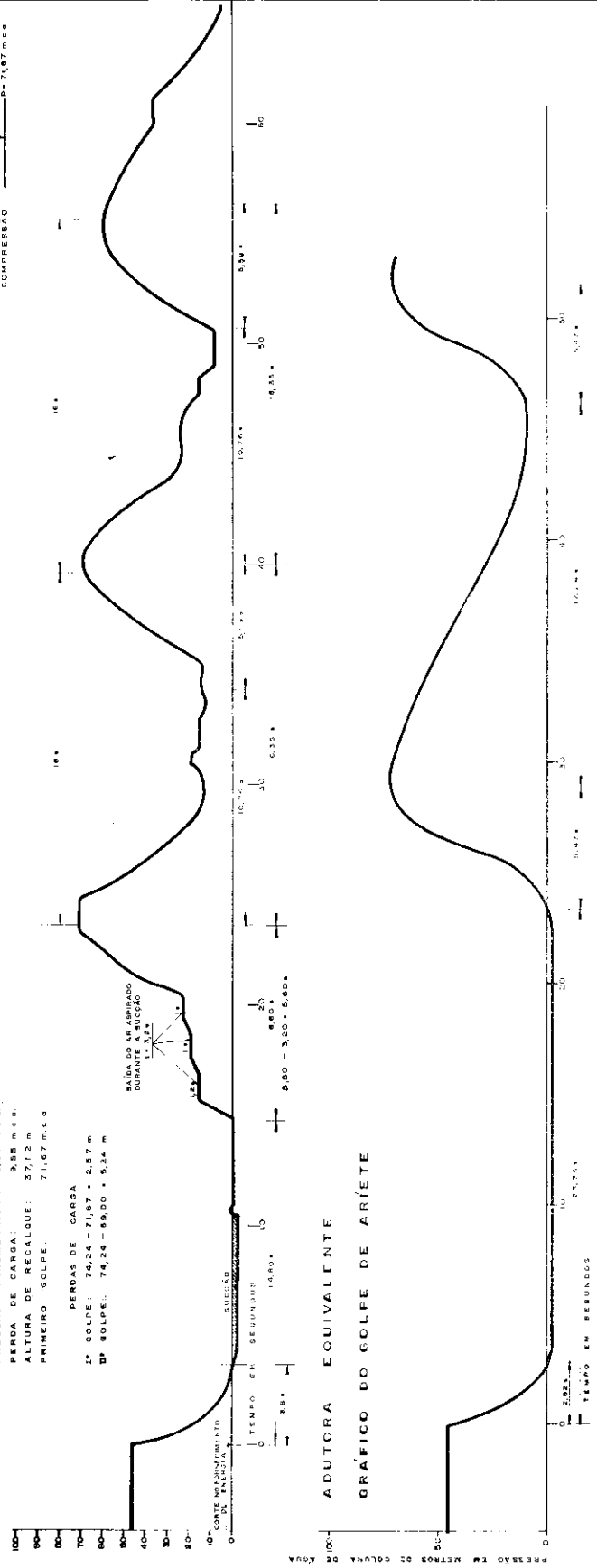
SAGA DO AR ASPIRADO DURANTE A RUÇÃO

10 CORTES MANUNUMENTO DA TUBERIA

TEMPO EM SEGUNDOS

ADUTORA EQUIVALENTE

GRÁFICO DO GOLPE DE ARIETE



Na queda de altura zero, a pressão **P** é dupla na secção inferior e nula no extremo superior.

O seu diagrama é triangular, portanto a pressão média que deformou a coluna foi igual a **P**. Mas,

$$P = h\gamma \quad \text{portanto} \quad V_m = \frac{h\gamma a}{Ea}$$

No fechamento instantâneo de uma corrente líquida, a sobrepressão é dada pela fórmula:

$$h' = \frac{aV}{g} \quad (3)$$

sendo h' expresso em unidades de comprimento, V a velocidade estancada, e a a velocidade da onde de choque ou celeridade.

Admitindo que a velocidade média de deformação foi estancada instantaneamente, temos

$$h' = \frac{a^2 h \gamma}{g Ea}$$

Se h' for igual a h , por tratar-se de uma queda de altura nula, chegamos à seguinte fórmula

$$a = \sqrt{\frac{g Ea}{\gamma}} \quad \text{ou generalizando} \quad a = \sqrt{\frac{g E}{\gamma}}$$

que é a fórmula de Newton, que dá a velocidade de propagação da onda de choque, ou do som, através de um corpo elástico, de módulo de elasticidade igual a E , e peso específico γ . Para a água encontramos, $a = 1424,3$ m/s.

Concluimos portanto, que, em uma linha de recalque, havendo perfeitas condições de funcionamento da válvula de retenção, o golpe de ariete será equivalente ao dôbro da altura estática diminuído da perda de carga que corresponde ao atrito da água contra as paredes da tubulação durante a queda de altura zero. No caso de um corpo sólido evidentemente não haverá esse atrito, e a pressão na secção de contato será exatamente igual a $2P$.

Na adutora de Santo Amaro, havendo um trecho em nível, o golpe de ariete foi provocado apenas pela parte em aclave. A pressão dupla da estática, ou $2P$, de diagrama triangular, provocou a seguinte deformação longitudinal na água contida nesse trecho.

$$\lambda_1 = \frac{PL}{2Ea} = \frac{74,24 \times 1000 \times 3060}{2 \times 207.000.000} = 0,54873 \text{ m}$$

O diâmetro interno do tubo deformado foi:

$$D_1 = D + \frac{D^2 P}{2 \times 2 \times e E_t} = 1,50 +$$

$$\frac{1,50^2 \times 74,24 \times 1000}{2 \times 2 \times 0,026 \times 10^{10}} = 1,5001606 \text{ m e}$$

$$\lambda_2 = 3060 \left(1 - \frac{1,50^2}{1,5001606^2} \right) = 0,65484 \text{ m}$$

E o encurtamento total teórico da coluna líquida:

$$\lambda_3 = \lambda_1 + \lambda_2 = 1,20357 \text{ m}$$

A velocidade de propagação da onda de choque ou celeridade nesse trecho, foi igual a

$$a_2 = \sqrt{\frac{g}{\gamma \left(\frac{1}{Ea} + \frac{1}{E_t} \cdot \frac{D}{e} \right)}} = 961,52 \text{ m/s}$$

o tempo total de percurso da onda foi

$$t_1 = \frac{L}{a_2} = \frac{3060}{961,52} = 3,182 \text{ s}$$

a velocidade média de deformação da água foi

$$V_1 = \frac{\lambda_3}{t_1} = \frac{1,20357}{3,182} = 0,37824 \text{ m/s}$$

e a sobre-pressão teria sido

$$H' = \frac{a_2 V_1}{g} = \frac{961,52 \times V_1}{9,8} = 37,11 \text{ m.c.a.}$$

Se os cálculos fossem exatos, acharíamos $H' = 37,12$ m, isto é, a altura equivalente à sobrepressão seria igual à altura de recalque, e o golpe de ariete teria por intensidade:

$$37,12 \times 2 = 74,24 \text{ m.c.a.}$$

Verificamos do gráfico da experiência que o golpe foi de apenas 71,67 m.c.a., havendo portanto uma perda de carga correspondente a

$$h_1 = 74,24 - 71,67 = 2,57 \text{ m.c.a.}$$

Da fórmula de Hazen-Williams, determinamos para essa adutora, conhecidos do gráfico da experiência a perda de carga total (9,55 m.c.a.) a vazão nesse dia (1,000 m³/s), e conhecidos também os diâmetros e comprimentos dos dois trechos, o coeficiente de rugosidade c igual a 85,06.

Conhecidos, o tempo de percurso da onda de choque em cada trecho da adutora, assim como a deformação longitudinal da coluna líquida em cada um, sob a pressão 2 P, isto é, 74,24 m.c.a., determinamos as duas velocidades médias de deformação. Empregando o mesmo coeficiente de rugosidade e, pela fórmula de Hazen-Williams calculamos as duas perdas de carga, que somadas atingem a 2,73 m.c.a.

A diferença entre esse valor, e aquele dado pelo gráfico, isto é, 0,16 m.c.a., em parte pode ser atribuída aos bolsões de ar, penetrados na adutora durante a fase de sucção, como ainda à falta de exatidão dos elementos que entraram no cálculo. Na realidade, o fenômeno é o resultado de um movimento harmônico amortecido.

Dado o primeiro golpe, a coluna líquida tende-se a descomprimir. Para se determinar o tempo de descompressão será necessário efetuar os seguintes cálculos.

Em repouso, isto é, sob a pressão de 37,12 m.c.a. a deformação teórica que sofre a coluna líquida é a seguinte:

a — parte inferior em nível, sujeito à pressão total. Utilizando as fórmulas (1) e (2), achamos $\lambda_4 = 0,836482$ m.

Transformando essa deformação da coluna inferior em equivalente da coluna superior, temos:

$$\lambda_5 = \lambda_4 \frac{S_1}{S_2} = 0,349835 \text{ m}$$

sendo S_1 e S_2 as seções da tubulação nos trechos inferior e superior respectivamente, e cujos diâmetros internos são iguais a 0,97 m e 1,50 m.

b — parte superior, em aclave, sujeita à metade da pressão de 37,12 m.c.a. Utilizando as mesmas fórmulas achamos $\lambda_6 = 0,600867$ m. A deformação total da coluna líquida sob a pressão de 37,12 m.c.a. foi portanto igual a

$$\lambda_7 = \lambda_5 + \lambda_6 = 0,950702 \text{ m}$$

Na situação descrita, as forças que causaram essa deformação foram as seguintes:

a — na parte inferior

$$F_1 = h_1 \gamma S_1 = 37,12 \times 1.000 \times 0,739 = 27.431,68 \text{ kgf}$$

b — na parte superior

$$F_2 = h_2 \gamma S_2 = \frac{37,12 \times 1.000 \times 1,767}{2} = 32.795,52 \text{ kgf}$$

cujas soma é igual a 60.227,20 kgf.

O coeficiente elástico do sistema será:

$$K = \frac{F_1 + F_2}{\lambda_7} = 63.350,24 \text{ kgf/m}$$

A massa total da coluna líquida é:

$$M = \frac{(L_1 S_1 + L_2 S_2) \gamma}{g} = 743.273,46 \text{ u.t.m}$$

E o semi período de oscilação do conjunto:

$$\frac{T}{2} = \pi \sqrt{\frac{M}{K}} = 10,76 \text{ s}$$

No fim desse semi período de oscilação, a coluna líquida atingiu a máxima descompressão, iniciando o segundo golpe. Determinadas as velocidades da onda de choque que em cada trecho ($a_1 = 1052,95$ m/s para a linha de aço e $a_2 = 961,52$ m/s para a de ferro fundido) e conhecidos os respectivos comprimentos, o tempo total de percurso da mesma ao longo de toda a canalização foi:

$$t_2 = 2,412 + 3,182 = 5,594 \text{ s ou } 5,60 \text{ s}$$

a primeira parcela refere-se à linha de aço, e a segunda à de ferro fundido. Esse tempo somado ao do semi-período de oscilação dará o tempo decorrido entre dois golpes consecutivos, ou seja 16,36 s.

O tempo médio entre 8 golpes consecutivos do gráfico é igual a 16 s. Atribuímos a diferença à falta de precisão dos dados adotados para o cálculo, como seja, o comprimento e a espessura das tubulações que constituíam a adutora em questão. Basta encurtar a adutora para se obter o resultado desejado.

Após a descompressão do primeiro golpe, restará uma pressão residual que pode ser determinada do seguinte modo:

A pressão de 71,67 m.c.a devido ao primeiro golpe provoca na coluna líquida, feitos todos os cálculos já indicados anteriormente, uma deformação total

$$\lambda_8 = 1,83689 \text{ m}$$

A deformação produzida pela sobre-pressão será pois:

$$\lambda_9 = \lambda_8 - \lambda_7 = 0,886188 \text{ m}$$

Tomando-se o nível superior teórico da coluna líquida sob a pressão estática, como sendo o plano que passa pelo eixo de oscilação do sistema, como indica a figura, após o golpe, a secção superior entrará em ascensão, descomprimindo a coluna. Essa ascensão, atingiu apenas a extremidade da ordenada + λ_9 , restando portanto uma compressão residual correspondente a

$$\lambda_{10} = \lambda_7 - \lambda_9 = 0,064514 \text{ m}$$

Trata-se pois de um movimento harmônico simples amortecido. Desprezando o amortecimento por ser pequeno, podemos calcular a compressão residual.

No movimento harmônico simples, a elongação é dada pela fórmula:

$$x = a \cos \left(\frac{2\pi}{T} t_3 + \theta_0 \right)$$

No nosso caso $\theta_0 = 0$, e a equação reduz-se a:

$$\lambda_9 = \lambda_7 \cos \frac{2\pi}{T} t_3$$

Resolvendo, achamos $t_3 = 1,26928 \text{ s}$.

A compressão residual será dada pela fórmula

$$P_x = P \cos \frac{2\pi}{T} t_4$$

Para o nosso caso:

$$t_4 = \frac{T}{4} - t_3 = \frac{10,76}{2} - 1,2692 = 4,1107 \text{ s}$$

A compressão residual será então

$$P_x = 37,12 \cos \left(\frac{2\pi}{21,52} \times 4,1107 \right) = 13,30 \text{ m.c.a.}$$

o que é confirmado pelo gráfico.

Após o primeiro golpe, a curva de descompressão deveria ser um cossenoide perfeito, dado pela equação.

$$P_x = 37,12 \cos \frac{2\pi t}{T}$$

cujas extremidade inferior seria dada pela abscissa $t = 4,1107 \text{ s}$. Com efeito, suponhamos uma tubulação elástica, horizontal, cheia d'água, fechada em uma das extremidades por um regis-

tro ou tampão, e na outra por um êmbolo sem atrito. Aplicando uma força F contra o êmbolo, este percorrerá uma distância λ , comprimindo a água no interior da tubulação. O coeficiente elástico do sistema terá sido:

$$K = \frac{F}{\lambda}$$

Se em seguida aplicarmos contra o êmbolo mais uma outra força F_1 , menor ou igual a F , este percorrerá uma nova distância λ_1 , e a deformação total que sofreu o cilindro líquido foi igual a

$$\lambda + \lambda_1$$

Se em dado instante suprimirmos a força F_1 , conservando a força F , o êmbolo retornará, passando pela posição **b** da figura, atingindo as proximidades do ponto **a**. Se F_1 for igual a F e não houver nenhum atrito, o ponto **a** será atingido em um tempo igual ao semi-período de oscilação do sistema, ou seja:

$$\frac{T}{2} = \pi \sqrt{\frac{M}{K}}$$

sendo M a massa de água contida na tubulação. Se F_1 for menor do que F , o êmbolo não atingirá o ponto **a**, e haverá uma compressão residual.

Verificamos do gráfico, que após o primeiro golpe, há uma descompressão rápida, não obedecendo a equação acima. Atribuímos a discrepância à presença de harmônicos, devidos a restos de ar no interior da canalização, e a outras causas desconhecidas. Pode-se notar que nos demais golpes, a forma cossenoide começa a ser obedecida.

Concluimos assim, que o tempo decorrido entre dois golpes consecutivos, é igual ao semi-período de oscilação acrescido do tempo de percurso da onda de choque ao longo de toda a canalização. Se a extremidade superior fôsse fechada no instante da sobre-pressão máxima, então haveria reflexão da onda de choque.

Na determinação do tempo decorrido entre o corte de energia e início do primeiro golpe, entraram em jogo os três seguintes elementos: energia cinética da corrente líquida, pressão equivalente à perda de carga, e inércia do conjunto motor-bomba.

A velocidade da corrente em relação ao segundo trecho, $\varnothing 1.50 \text{ m}$ foi:

$$V_2 = \frac{Q}{S} = \frac{1,000}{1,767} = 0,566 \text{ m/s}$$

A declividade média da adutora nesse dia era:

$$J = \frac{37,12}{5600} = 0,006628 \text{ m/m}$$

e a aceleração da gravidade média na direção da corrente:

$$g' = gJ = 0,06496 \text{ m/s}^2$$

Portanto, o tempo de duração da inércia da corrente líquida foi igual a

$$t_5 = \frac{V_2}{g'} = 8,716 \text{ s}$$

A pressão equivalente à perda de carga (9,55 m.c.a.) para reduzir-se totalmente, demanda um tempo

$$t_6 = \frac{T}{4} = 5,38 \text{ s}$$

O tempo de duração da inércia do conjunto motor bomba, desconhecido, poderá ser deduzido do gráfico. Pelo mesmo, vê-se que o tempo total decorrido entre o corte de energia e o início do primeiro golpe, foi igual a 14,8 s. Por conseqüência o tempo de inércia do conjunto motor-bomba teria sido igual a:

$$t_7 = 14,8 - 8,71 - 5,38 = 0,71 \text{ s}$$

O tempo decorrido entre o corte da energia e fim da descompressão depende da velocidade da corrente líquida, da energia contida na perda de carga (9,55 m.c.a.) e da inércia do conjunto motor-bomba.

A perda de carga (9,55 m.c.a.) fazendo-se todos os cálculos anteriores, produz na coluna líquida uma deformação total:

$$\lambda_{11} = 0,2446 \text{ m}$$

a força total que produziu essa deformação foi

$$F = 9,55 \gamma \left(S_1 + \frac{S_2}{2} \right) = 15495 \text{ kgf}$$

e o trabalho de deformação realizado por ela:

$$E = F\lambda_{11} = 3790 \text{ kgm}$$

Mas

$$E = \frac{M V_3^2}{2} \therefore V_3 = \sqrt{\frac{2E}{M}} = 0,10099 \text{ m/s}$$

e o tempo de duração desse trabalho

$$t_8 = \frac{V_3}{g'} = 1,554 \text{ s}$$

A descompressão da pressão estática (37,12 m.c.a.) foi realizada pela coluna em ascensão. A deformação total correspondente λ_7 foi percorrida pela secção superior da coluna líquida em um tempo

$$t_7 = \frac{V_2 - \sqrt{V_2^2 - 2g' \lambda_7}}{g'} = 1,879 \text{ s}$$

sendo V_2 a velocidade de recalque relativamente ao trecho superior $\varnothing 1,50 \text{ m}$.

O tempo de descompressão dado pelo gráfico foi de 3,8 s, e a duração da inércia do conjunto motor-bomba teria sido:

$$t_8 = 3,80 - t_7 - t_6 = 0,37 \text{ s}$$

Anteriormente, achamos para a inércia do conjunto motor-bomba, um tempo igual a 0,71 s. Levando-se em conta uma série de elementos não rigorosamente exatos que entraram no cálculo, podemos dizer que a válvula de retenção fechou-se meio segundo após o corte no fornecimento de energia elétrica.

ADUTORA EQUIVALENTE

Baseando-nos no raciocínio anterior, vamos estudar o golpe de ariete numa adutora equivalente, isto é, com a mesma perda de carga, mesma vazão, mesmo comprimento, mesma altura de recalque e mesmo coeficiente de rugosidade. Admitiremos a declividade constante, e a tubulação em ferro fundido, com 0,026 m de espessura, e ausência de «ventosas».

Da fórmula de Hazen Williams encontramos para essa adutora um diâmetro interno igual a 1,182 m. Apresentamos a seguir os resultados obtidos do cálculo:

- 1 — velocidade da onda de choque: 1022,40 m/s.
- 2 — tempo de percurso da onda de choque: 5,477 s.
- 3 — perda de carga no primeiro golpe: 1,23 m.c.a.
- 4 — intensidade do primeiro golpe: 73,01 m.c.a.
- 5 — semi-período de oscilação: 17,241 s.

- 6 — compressão residual após o primeiro golpe: 10,25 m.c.a.
- 7 — tempo total de descompressão: 2,82 s.
- 8 — tempo decorrido entre o corte de energia e o início do primeiro golpe: 23,36 s.
- 9 — velocidade de recalque para a vazão de 1.000 m³/s; 0,91132 m/s.

Com êsses elementos construímos o gráfico do golpe de aríete, que acompanha êste estudo.

Para que o golpe seja total, é necessário que a vazão de recalque descomprima totalmente a adutora durante a fase de ascensão.

Sendo λ a deformação total teórica da coluna líquida sob a pressão manométrica, a velocidade mínima de recalque deverá ser aproximadamente igual a:

$$V = \sqrt{2 g' \lambda}$$

Para adutora equivalente $v = 0,40$ m/s. Na realidade essa velocidade será ainda menor, pois a perda de carga diminui com a mesma. Para velocidades menores do que essa, a sobre-pressão será ainda menor e poderá ser determinada pelo cálculo.

Para se evitar o golpe de aríete, o método mais aconselhável é o emprêgo de aparelhos anti-golpe, que permitam a saída de água da adutora durante a fase da sobre-pressão. Para que o golpe seja nulo, será necessário permitir a saída de um volume de água igual ao produto da secção do tubo, pela deformação total teórica provocada pela sobre-pressão.

No caso da adutora equivalente êsse volume seria:

$$V = 1,038 \text{ m}^3$$

Em um ponto qualquer da adutora, a intensidade do golpe de aríete será evidentemente proporcional à sua cota. Será máxima no ponto mais baixo e nula no de maior altura.

Vamos supor agora que não houvesse fechamento da válvula de retenção imediatamente após o fim do período de inércia da coluna líquida, e admitir um intervalo de tempo Δt entre êsse instante e o fechamento. Nesse caso haveria uma corrente de retôrno, cuja velocidade seria igual a:

$$V = (g' - g_R) \Delta t$$

sendo g_R a aceleração proveniente da resistência devida ao atrito da água contra as paredes da tubulação.

Na adutora equivalente, admitindo Δt igual a 10 segundos por exemplo, e desprezando a aceleração g_R por sêr pequena, a velocidade de retôrno da coluna líquida quando houvesse o fechamento da válvula de retenção seria igual a

$$v = 0,06496 \times 10 = 0,6496 \text{ m/s}$$

E o primeiro golpe teria por intensidade

$$H = 73,01 + \frac{1022,40 \times 0,6496}{9,6} = 142,80 \text{ m.c.a.}$$

o que poderia ter conseqüências desastrosas na ausência de aparelhos anti-golpe.