

Diâmetro econômico das canalizações de recalque (adaptação e atualização da fórmula de Koch e Vibert)

Eng. Carlos Alfredo Richter
Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR

Para se recalcar uma vazão Q a uma dada altura geométrica, pode-se escolher um diâmetro qualquer e dar aos conjuntos de recalque uma potência suficiente para vencer a altura geométrica mais as perdas de carga. Quanto menor for este diâmetro para uma mesma vazão, tanto maior será a perda de carga e, conseqüentemente, a potência dos conjuntos de recalque e, portanto, maior será a energia despendida, elevando-se também os custos dos conjuntos elevatórios.

Ao contrário, adotando-se um maior diâmetro, menor será o consumo de energia, porém o custo da canalização crescerá de forma exponencial.

Do ponto de vista econômico, portanto, a canalização de recalque e a estação de bombeamento são interdependentes, havendo interesse de se conhecer o diâmetro para o qual o custo total é um mínimo, conciliando-se as seguintes tendências opostas: — os custos operacionais da estação de recalque, dos quais a parcela preponderante refere-se à energia elétrica, decrescentes com o aumento do diâmetro;

— os custos financeiros, devido à amortização da canalização, crescentes com o aumento do diâmetro.

Uma fórmula, bastante simples, que permite uma aproximação do valor ótimo, é a fórmula de Bresse

$$D = K \sqrt{Q}$$

Esta fórmula foi deduzida admitindo-se que o custo da canalização é uma função linear do diâmetro e que a instalação de recalque opera continuamente 24 horas por dia.

Sob a condição de funcionamento de apenas algumas horas por dia, a fórmula anterior torna-se

$$D = k n^{1/4} \sqrt{Q}$$

onde:

$$n = \frac{\text{n.º de horas de bombeamento/dia}}{24}$$

também chamado de coeficiente de utilização.

Além de se considerar o período diário de operação no dimensionamento econômico da adutora, é conveniente utilizar-se uma fórmula para cálculo de perdas de carga na determinação da energia despendida, que apresente resultados confiáveis, de uso habitual em cálculos desta natureza, e, preferencialmente, a mesma utilizada no dimensionamento hidráulico. A fórmula de Hazen-Williams

$$J = 10,643 C^{-1,85} Q^{1,85} D^{-4,87} \quad [1]$$

satisfaz plenamente a estas condições.

Deve-se considerar também que o custo C da canalização não é linear com o diâmetro, como admitido na fórmula de Bresse, mas é uma função exponencial.

$$(*) C = K D^{1,5} \quad [2]$$

Para os preços atuais em cruzelros, conforme o gráfico da figura 1, resulta para tubos de ferro fundido, a equação

$$C = 15,3 \times 10^4 D^{1,5} \quad [3]$$

em dólares,

$$C = 340 D^{1,5} \quad [3.a]$$

Com as considerações anteriores, tenta-se, a seguir, otimizar a solução para a determinação do diâmetro de uma adutora de recalque, seguindo a mesma metodologia da fórmula proposta por Koch e Vibert (1948), porém com a utilização da fórmula de Hazen-Williams.

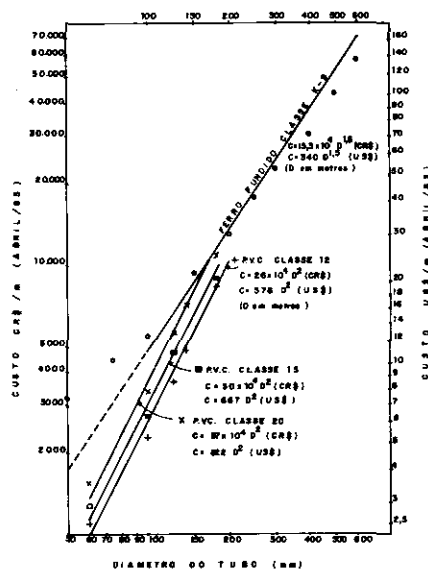
Como se viu anteriormente, o diâmetro mais econômico é aquele em que o custo total é um mínimo, ou seja, deve-se achar o valor que anule a derivada do custo em função do diâmetro.

Custos Financeiros

Entre os valores mais próximos ao diâmetro econômico dos condutos de

(*) O expoente pode ser diferente do valor determinado na figura 1, dependendo do material dos tubos. Porém é sempre maior do que 1,0 e, via de regra, ao redor do valor encontrado 1,5 para tubos de ferro fundido e 2,0 para tubos de PVC.

Figura 1 — Custos de tubos de ferro fundido e PVC



recalque, as correspondentes diferenças de custo das instalações de bombeamento e de assentamento da adutora podem ser desprezadas e, conseqüentemente, será considerada somente a parcela de investimento correspondente ao preço dos tubos.

Para calcular a amortização e os juros pagos anualmente em parcelas iguais, por um capital C , é utilizado o fator de recuperação do capital

$$R = \frac{e^i - 1}{1 - e^{-xi}} \quad [4]$$

onde i é a taxa de juros e x o tempo expresso em anos.

Deste modo, o custo financeiro anual de uma adutora de diâmetro D é (eq. 2)

$$R = K D^{1,5}$$

sendo o volume de água aduzido anualmente igual a

$$n \times 365 \times 86\,400 Q$$

o custo para amortizar 1 m^3 de água será

$$C_1 = \frac{R K D^{1.5}}{n \cdot 365 \times 86\,400 Q}$$

ou

$$C_1 = 3,2 \times 10^{-8} \frac{R K D^{1.5}}{n Q} \quad [5]$$

Custos Operacionais

O trabalho necessário à elevação virtual de 1 m³ de água à altura J (perda de carga unitária) é

$$E = \gamma J = 1000 J \text{ (em kg m)}$$

ou

$$E = \frac{9,81}{3600} J \text{ (em kWh)} \quad [6]$$

Substituindo J dado pela expressão [1] na equação anterior [6], e sendo η o rendimento dos conjuntos moto-bomba, vem

$$E = \frac{9,81 \times 10,643}{3600} \frac{C^{-1,85}}{\eta} Q^{1,85} D^{-4,87} \quad [7]$$

e, sendo \bar{e} o preço do kWh, a despesa com energia elétrica por m³ de água recalçada por metro de adutora, devido à perda de carga é

$$C_2 = 2,9 \times 10^{-2} \frac{\bar{e}}{\pi} Q^{1,85} D^{-4,87} \quad [8]$$

O custo total é obtido somando-se [5] e [8]

$$C_t = 3,2 \times 10^{-8} \frac{R K D^{1.5}}{n Q} + 2,9 \times 10^{-2} \frac{C^{-1,85}}{\eta} Q^{1,85} D^{-4,87}$$

Derivando e igualando a zero a expressão anterior, vem

$$4,8 \times 10^{-8} \frac{R K D^{0,5}}{n Q} - 14,1 \times 10^{-2} \frac{C^{-1,85}}{\eta} Q^{1,85} D^{-5,87} = 0$$

ou explicitando D

$$D = 10,84 \left(\frac{n \bar{e}}{R K \eta} \right)^{0,16} C^{0,29} Q^{0,45} \quad [9]$$

Para as condições atuais:

$$\bar{e} = \text{Cr\$ } 5,678/\text{kWh}$$

$$K = 15,3 \times 10^4 = 153.000$$

$$i = 5,5\% \text{ e}$$

$$x = 18 \text{ anos, portanto (eq. 4)}$$

$$R = \frac{e^i - 1}{1 - e^{-x}} = \frac{e^{0,055} - 1}{1 - e^{-0,99}} = 0,08997$$

resulta

$$D = 10,84 \left(\frac{5,678}{0,08997 \times 15,300} \right)^{0,16} \left(\frac{n}{\eta} \right)^{0,16} C^{-0,29} Q^{0,45}$$

ou

$$D = 3,12 \left(\frac{n}{\eta} \right)^{0,16} C^{-0,29} Q^{0,45} \quad [10]$$

Por exemplo uma instalação de recalque projetada para recalcar 140 l/s, com um período médio de operação diário de 18 horas, um rendimento dos conjuntos moto-bomba igual a 0,7, em uma canalização com C = 120, o diâmetro econômico será:

$$D = 3,12 \left(\frac{18}{24 \times 0,7} \right)^{0,16} (120)^{-0,29} (0,14)^{0,45} = 0,325$$

ou seja D = 350 mm, resultando uma velocidade de 1,5 m/s.

Pequenas Instalações

Quando a vazão a recalcar é pequena e se vai utilizar tubos de plástico de pequeno diâmetro (de 60 mm a 180 mm), a função de custo da canalização toma a forma:

$$C = k D^2 \quad [11]$$

e a fórmula para a determinação do diâmetro econômico resulta em

$$D = 8,94 \left(\frac{n \bar{e}}{R K \eta} \right)^{0,15} C^{-0,27} Q^{0,41} \quad [12]$$

O coeficiente K tem seu valor dependendo da classe do tubo.

Assim, o coeficiente da equação custo é dado em Cr\$ (fig. 1) para a classe 12 K = 26 x 10⁴
 classe 15 K = 30 x 10⁴
 classe 20 K = 37 x 10⁴

Exemplo:

Determinar o diâmetro econômico de uma adutora por recalque, cuja

pressão de serviço deverá ser da ordem de 70 mca (tubos classe 15), para abastecer a vila de população 3.000 habitantes (população atual = 1.500 hab.). Estudos prévios determinaram que o período ótimo de funcionamento das unidades de produção deverá ser de 18 horas ao final do período de projeto.

Dados:

Consumo "per capita" 175 l/dia
 Coeficiente para o dia de maior consumo K = 1,3
 Custo de energia elétrica = Cr\$ 5,678 kWh
 Rendimento das bombas $\eta = 0,65$
 Fator de recuperação do capital R = 0,09 (para i = 5,5% e x = 18 anos)
 K = 30 x 10⁴

Cálculos:

$$Q = \frac{1,3 \times 175 \times 3\,000}{18 \times 3\,600} = 10,5 \text{ l/s} = 0,01 \text{ m}^3/\text{s}$$

a população inicial sendo a metade da população de projeto, o período médio de operação diário será

$$\frac{18 + 9}{2 \times 1,3} = 10,38 \text{ h}$$

$$n = \frac{10,38}{24} = 0,43$$

Substituindo os valores dados na equação [12], e considerando um coeficiente da fórmula de Hazen-Williams C = 150 (tubos de PVC) resulta

$$D = 8,94 \left(\frac{0,43 \times 5,678}{0,65 \times 0,09 \times 30 \times 10^4} \right)^{0,15} (150)^{-0,27} Q^{0,41}$$

$$D = 0,61 Q^{0,41}$$

$$D = 0,61 (0,01)^{0,41} = 0,092$$

$$D = 100 \text{ mm.}$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO NETTO, J. M. — Manual de Hidráulica, 6.ª Ed., Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 1973.
 DEGREMONT — Manual Técnico del Agua, 1973.
 THVESEN, H. G. e FABRYCKY, W. J. — Engineering Economy, Prentice-Hall of India Ltd., New Delhi, 1965.