

Cálculo do Diâmetro Econômico da Tubulação Forçada das Usinas Hidroelétricas (*)

Por **G. S. SARKARIA**, Engenheiro da
International Engineering, Co., São
Francisco — Califórnia

Tradução de **Renato Mattos Zuccolo**,
Revista pelo **Prof. José M. de Azevedo
Netto**.

A escolha do diâmetro mais econômico da tubulação forçada é uma das fases mais importantes de um projeto hidro-elétrico. A tubulação forçada além de ser capaz de conduzir com segurança a quantidade de água requerida para geração da energia que se deseja, deverá fazê-lo com eficiência e economia. Teoricamente, há um só diâmetro de tubulação forçada adequado para cada caso de instalação. Na prática poderia ser desejável uma tubulação forçada com diâmetro variável, sendo o seu valor médio o diâmetro econômico. A presente discussão está limitada às tubulações forçadas de chapas de aço soldadas e com diâmetro constante, embora os processos descritos tenham aplicação mais vasta.

Há dois métodos para a obtenção do diâmetro de uma tubulação forçada. O primeiro, que é uma aproximação empírica, é constituído de fórmulas simples, baseadas na experiência e em dados extraídos de instalações existentes. Se as informações relativas aos preços previstos da instalação e à potência futuramente requerida não forem precisas, é conveniente o uso destas fórmulas empíricas. O autor acredita que as fórmulas empíricas aqui discutidas dêem resultados seguros, conforme mostra o exemplo descrito. O segundo, que é o método usual, consiste em fazer-se uma comparação detalhada de preços para diversos diâmetros de tubulação forçada. Ambos os métodos serão descritos, e os resultados comparados com o auxílio de um exemplo.

FÓRMULAS EMPÍRICAS

Uma fórmula baseada em dados extraídos de instalações que representam uma longa prática, e compatível com considerações teóricas, foi proposta pelo autor ((1)).

A expressão do diâmetro econômico será:

$$D = 0,626 \frac{(P)^{0,43}}{(H)^{0,65}} \quad (1)$$

onde:

D = diâmetro econômico da tubulação forçada em metros

P = potência nominal da turbina em HP

H = carga nominal da turbina em metros.

(*) Artigo publicado na "Water Power" (Setembro 1958).

Esta fórmula que é aplicável principalmente às instalações com turbinas Francis e do tipo hélice, dá bons resultados para tubulações forçadas com diâmetro de 1,50 m ou maiores.

Uma outra fórmula empírica ((2)), também baseada na potência e carga nominais da turbina é a seguinte:

$$D = 0,176 \left(\frac{P}{H} \right)^{0,466} \quad (2)$$

O U. S. Bureau of Reclamation ((3)) usa a seguinte fórmula empírica que fornece a velocidade econômica:

$$v = 0,125 \sqrt{2gH} \quad (3)$$

Estas três fórmulas são de grande utilidade na obtenção rápida de valores, o que constataremos pela comparação dos resultados por elas obtidos com aqueles fornecidos pela extensa análise de custo para o seguinte exemplo.

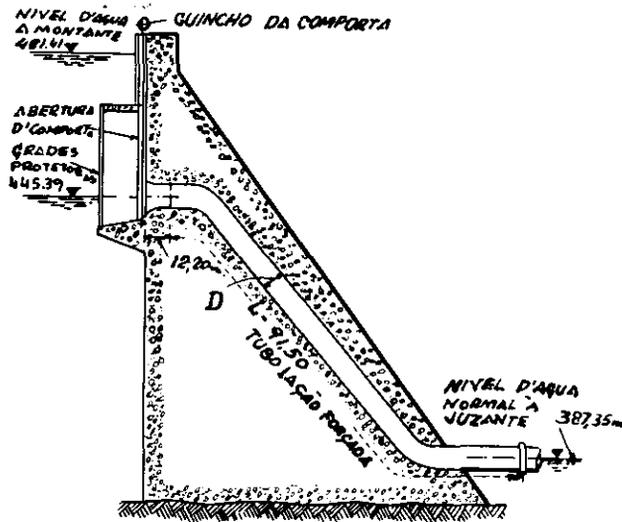


Fig 1

Os dados para a instalação da Fig. 1 são os seguintes:

Tipo de turbina	Francis
Carga nominal	H = 85,40 m
Potência nominal	P = 155.000 HP
Comprimento da tubulação forçada de aço	L = 91,50 m
Esfôrço admissível médio na chapa da tubulação forçada	1000 Kg/cm ²
Eficiência da Junta	90%
Fator de carga (para demanda de Potência)	60%
Vida útil assumida da instalação	50 anos

Determinemos o diâmetro econômico da tubulação forçada. Usando-se a equação (1), o diâmetro econômico será:

$$D = 0,626 \frac{(155.000)^{0,43}}{(85,40)^{0,13}} = 0,626 \frac{170}{18,0} = 5,91 \text{ m}$$

O resultado fornecido pela equação (2), será:

$$D = 0,176 \left(\frac{155.000}{85,40} \right)^{0,466} = 5,82 \text{ m}$$

Se ainda assumirmos a velocidade econômica igual a $0,125 \sqrt{2gH}$ ou seja 5,10 m/s e a vazão 126 m³/s, o diâmetro encontrado será 5,60 m.

Para verificarmos estes resultados, examinaremos e compararemos seis diâmetros: de 5,20 m até 6,70 m com intervalos de 0,30 m.

VAZÃO ANUAL MÉDIA

Desde que é improvável a produção uniforme de energia durante o período de um ano, será desejável basear-se a comparação das grandezas na vazão anual média estimada para a turbina. Uma curva de duração de potência, que também indica variações na vazão requerida da tubulação forçada, é obtida do estudo de operação do reservatório, baseado em dados hidrológicos aproveitáveis. Uma curva típica de duração de potência que se assume ser aplicável ao caso presente, é mostrada na fig. 2.

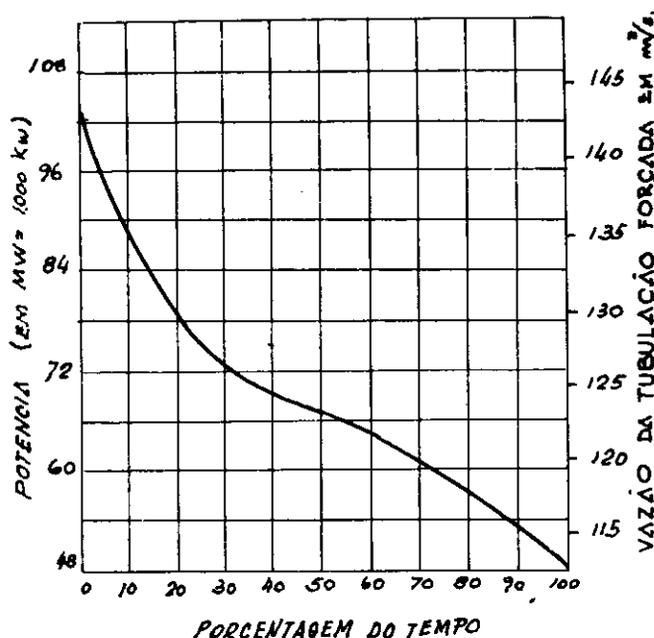


Fig. 2

Os valores da vazão, Q , são marcados numa escala tal que a curva de duração de potência também indica a duração de vazão da tubulação forçada. A vazão anual média é então igual à média ponderada obtida da curva de duração de vazão. Com auxílio da fig. 2, o valor da vazão anual média admissível para condições "ótimas" de geração de energia, através da tubulação forçada será achado igual a 126 m³/s.

FORMA DA TOMADA D'ÁGUA

A tomada d'água é suposta ter uma entrada retangular, adequada para uma comporta do tipo de roda fixa, e uma transição gradual, lisa, de 12,00 m de comprimento, desde a forma retangular até a tubulação forçada circular. Afim de reduzir-se a um mínimo as perdas na tomada, estima-se que a área da secção retangular deva ser 1,67 vezes a área do tubo. Por sua vez a altura da entrada retangular é igual a duas vezes a largura. As dimensões da entrada da tomada e as velocidades são dadas na Tabela I para os vários diâmetros examinados. Contudo, deve ser dito que o tamanho mais adequado da comporta da tomada depende freqüentemente de outras considerações e critérios que tem maior influência do que o diâmetro da tubulação forçada.

TABELA I

D (m)	Área da Tubulação forçada (m ²)	Área da Tomada (m ²)	Dimensões da Tomada (m)	Q=0,60×126 (m ³ /s)	Velocidade na entrada (m/s)
5,20	21,25	35,50	4,21 × 8,42	75,4	2,12
5,50	23,70	39,50	4,45 × 8,90	75,4	1,91
5,80	26,50	44,30	4,70 × 9,40	75,4	1,70
6,10	29,20	48,70	4,93 × 9,86	75,4	1,55
6,40	32,20	53,80	5,19 × 10,38	75,4	1,40
6,70	35,40	59,00	5,42 × 10,84	75,4	1,28

A perda de carga h_e na transição de entrada é assumida igual a $0,2 \frac{v_e^2}{2g}$.
Adiante, quando os preços forem estimados os tamanhos das comportas e stop-logs (dispositivo de vedação com pranchões) são tomados aproximadamente iguais aos das tomadas.

PERDAS DE CARGA

As seguintes perdas, exceção feita à carga de velocidade h_v , são deduzidas da carga total para obter-se a carga útil:

Perda na grade protetora, $h_g = 0,15$ m (assumida constante) para a velocidade 0,60 m/s

$$\text{Perda na entrada, } h_e = 0,2 \frac{v_e^2}{2g} = 0,2 h_{ve}$$

Carga de velocidade, $h_v = \frac{v^2}{2g}$; V = velocidade média na tubulação forçada

Perda na transição, $h_t = 0,1 (h_v - h_{ve})$

Perdas nas curvas, h_c

$$= 0,15 h_v \text{ para a curva de } 35^\circ \text{ da cota } 445,39 \text{ m}$$

$$= 0,19 h_v \text{ para a curva de } 52^\circ \text{ da cota } 387,35 \text{ m}$$

$$\text{Perda por atrito, } h_a = 0,83 \cdot \frac{(v)^{1,9}}{(D)^{1,1}} \cdot \frac{L}{1.000}$$

$$\text{Para } L = 91,50 \text{ m, } h_a = 0,076 \frac{(v)^{1,9}}{(D)^{1,1}}$$

Estas perdas são dadas na Tabela II para os vários diâmetros investigados.

TABELA II

Perdas de carga	Diâmetro da tubulação forçada (m)					
	5,20	5,50	5,80	6,10	6,40	6,70
h_r	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
h_e	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
h_t	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
h_c (35°)	0,10	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03
h_c (52°)	0,12	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04
h_u	0,14	0,11	0,08	0,06	0,05	0,04
Perda de carga Total } H_L	0,60	0,50	0,43	0,37	0,33	0,30

A Perda de carga total (H_L) na tubulação forçada representa uma perda direta de capacidade de geração. Para uma eficiência combinada de turbina e gerador de 85% a perda de potência será:

$$\text{Perda de Potência em Kg m/s} = Q \times H_L \times 0,85$$

$$Q \text{ em l/s} = 126\,000 \text{ l/s}$$

$$H_L \text{ em metros}$$

Perda de Potência em

$$\text{Kw} = \frac{9,8}{1.000} \times Q \times H_L \times 0,85$$

Perda de Potência em

$$\text{Kw} = 1.050 H_L \quad (4)$$

A perda financeira anual à razão de 0,6 cents por Kwh, com um fator de carga 60% será:

$$365 \times 24 \times 0,6 \times 1.050 \times H_L \times \frac{0,6}{100} = \$ 33.000 H_L \text{ (em dólares)} \quad (5)$$

A estimativa da perda financeira com base em um ano é realmente ilusória. Como as perdas incidem permanentemente, o valor atual das anuidades deve ser considerado. Visto ser de 50 anos a vida útil estimada da instalação, e o juro médio assumido de 4% (composto), o valor atual das anuidades da perda anual em dólares é $21,482 \times 33000 \times H_L$.

Os valores atuais das anuidades da perda de energia para os diferentes diâmetros da tubulação forçada são dados na Tabela III.

CUSTO DA TUBULAÇÃO FORÇADA

Para estimar-se o custo da tubulação forçada de chapa de aço, admite-se que a tubulação seja capaz de resistir à pressão hidrostática interna bem como à pressão dinâmica devida ao golpe de ariete. Esta última é assumida ser máxima na extremidade inferior da tubulação forçada, igual a 30% da carga estática, e variar linearmente até zero na tomada.

TABELA III

Diâmetro da Tubulação Forçada (m)	H _L (m)	Perda anual de Potência (em dólares)	Valor capitalizado da perda de energia (em dólares)
5,20	0,60	19 800	425 000
5,50	0,50	16 500	354 000
5,80	0,43	14 100	302 000
6,10	0,37	12 200	261 000
6,40	0,33	10 850	233 000
6,70	0,30	9 900	212 500

Carga estática na tubulação forçada = 481,41 — 387,35 = 94,06 m.

Carga máxima possível na extremidade inferior da tubulação forçada:

$$H_{\max} = 1,3 \times 94,06 = 122,00 \text{ m}$$

Carga total possível na extremidade superior da tubulação forçada:

$$H_{\min} = 36,02 + 0,3 (481,41 - 387,35) \frac{12,20}{12,20 + 91,50} = 39,35 \text{ m}$$

A espessura em centímetros da chapa para um tubo de diâmetro igual a D (m), sujeito a uma carga h (m), para a eficiência de junta igual a 90%, e para um esforço admissível de 1000 kg/cm², é obtida pela fórmula do cilindro sujeito a pressão interna:

$$2t \times 1 \times 1000 = 1 \times (D \times 100) \times (0,1 h) \times \frac{1}{0,9}$$

$$t = 0,00555 D h \quad (6)$$

Contudo, a espessura da chapa não deve ser inferior a um certo mínimo, para evitar-se a deformação do tubo durante a montagem. Uma fórmula comumente usada para obter-se a espessura mínima em centímetros da chapa é:

$$\text{Mínimo } t = \frac{39,5 D + 20}{158} \quad (7)$$

Na Tabela IV, t_{\min} será a espessura da chapa obtida pela equação (6) usando H_{\min} , ou pela equação (7), figurando a maior das duas. A máxima espessura da chapa é calculada usando-se H_{\max} , na equação (6). A espessura média, t_m , é usada para determinar-se o peso total da tubulação forçada de 91,50 m de comprimento pel seguinte equação:

$$\text{Peso de chapa da tubulação} = \pi D \frac{t_m}{100} \times 91,5 \times 7800 = 22.400 \times D t_m \quad (8)$$

O custo de fornecimento de chapa de aço adequada para tubulações forçadas, e em várias espessuras, é estimado ser igual a 32 cents de dólar por Kilograma para todos os tamanhos de tubulação forçada. O custo de fabricação e instalação, incluindo-se calandragem, anulação dos esforços térmicos de soldagem, inspeção com raios X, e ensaio de pressão hidrostática, depende da espessura da chapa bem como do diâmetro da tubulação forçada. Este custo é mais alto para as chapas mais espessas e para diâmetros maiores, e estima-se variar o preço de chapa por Kilograma conforme se indica na Tabela V.

TABELA IV

Diâmetro D (m)	t_{\min} (cm)	t_{\max} (cm)	t_{med} (cm)	Pêso da chapa da tubulação (Kg)
5,20	1,42	3,53	2,48	288 000
5,50	1,51	3,72	2,62	322 000
5,80	1,57	3,94	2,76	359 000
6,10	1,65	4,15	2,90	395 000
6,40	1,73	4,34	3,04	434 000
6,70	1,81	4,55	3,18	477 000

TABELA V

Diâmetro D (m)	Pêso da chapa da tubulação (Kg)	Custo em dólares por Kg de chapa	Custo em dólares da fabricação e instalação por Kg de chapa	Custo Total da Tubulação em dólares
5,20	288 000	0,32	0,26	167 000
5,50	322 000	0,32	0,28	193 000
5,80	359 000	0,32	0,30	223 000
6,10	395 000	0,32	0,32	254 000
6,40	434 000	0,32	0,34	286 000
6,70	477 000	0,32	0,36	325 000

ARMADURA EM TÔRNO DA TUBULAÇÃO FORÇADA

Quando a tubulação forçada é engastada no corpo da barragem, como mostra a fig. 1, o concreto ao redor da tubulação deve ser provido de armadura reforçada. A finalidade desta armadura é impedir a ruptura do concreto junto à tubulação, devida à concentração de esforços causada pelos esforços na barragem e quando a tubulação está vazia. O projeto desta armadura é complicado e extenso, e portanto não foi incluído neste artigo. Para uma tubulação forçada de 6,10 m de diâmetro e para uma barragem do tamanho da mostrada na fig. 1, a armadura circunferencial foi estimada variar desde uma fileira de barras de 1¼ pol. de diâmetro espaçadas de 30 cm ao redor da extremidade superior da tubulação, até duas fileiras de barras de 1½ pol. de diâmetro espaçadas de 15 cm ao redor da extremidade inferior da tubulação forçada. Além disso, usaram-se barras longitudinais de ¾ pol. de diâmetro espaçadas de 30 cm, como armadura de distribuição. A quantidade total de ferro depende do diâmetro da tubulação forçada, e está estimada na Tabela VI para os diferentes tamanhos. O preço das barras de aço da armadura é assumido ser de 22 cents por Kilograma.

TABELA VI

Diâmetro D (m)	Armadura ao redor da tubulação (Kg)	Custo em dólares da armadura
5,20	136 000	30 000
5,50	143 280	31 600
5,80	150 560	33 200
6,10	175 840	34 800
6,40	165 120	36 400
6,70	172 140	38 000

Estas estimativas não incluem a armadura ao redor da transição e na estrutura da grade protetora. Para tornar a comparação mais simples, esta armadura é admitida igual para tôdas as tubulações forçadas consideradas. Estas quantidade é estimada ser 45.400 Kg, e seu custo (10 000 Dólares) será acrescentado ao custo total de cada tubulação forçada.

APOIOS DE MONTAGEM

Durante a instalação das secções de tubulações forçadas inclinadas usam-se comumente apóios de aço estrutural como suportes. Êstes suportes são embutidos no concreto durante a concretagem da barragem, e portanto, devem ser incluídos nas estimativas de custo da tubulação forçada. Assume-se que as tubulações forçadas sejam fabricadas por partes em oficina, e que as secções do tubo de 9,15 m de comprimento serão instaladas uma por vez. O pêso de um suporte típico para tubulação forçada de 9,15 m de comprimento e 6,10 m de diâmetro é estimado ser de 1900 Kg. Desde que serão necessários dez dêstes suportes, o pêso total dos suportes de montagem de aço para uma tubulação forçada de 6,10 m de diâmetro, será igual a 19000 Kg. Para outros tamanhos, as quantidades necessárias de suportes de aço, e custos ao preço de 44 cents por Kg, são dadas na Tabela VII.

TABELA VII

Diâmetro D (m)	Pêso dos apoios (Kg)	Custo dos apóios em dólares
5,20	18 350	8 070
5,50	18 570	8 160
5,80	18 790	8 250
6,10	19 000	8 350
6,40	19 400	8 520
6,70	20 000	8 800

ENTRADA DA TOMADA; GUINCHOS; GRADES PROTETORAS

Como foi mencionado anteriormente, o tamanho da entrada retangular da tomada depende do diâmetro da tubulação forçada. Quanto maior o diâmetro da tubulação forçada, tanto maior será a tomada, e portanto, tanto maior o tamanho da comporta necessária. Estas comportas são projetadas em função da carga de 36 m e seus tamanhos e custos são estimados para os vários diâmetros de tubulação forçada na Tabela VIII. O custo de fornecimento e instalação das comportas de roda fixa é tomado igual a 1,66 dólares por Kg.

TABELA VIII

Diâmetro D (m)	Tamanho da comporta		Pêso da comporta (Kg)	Custo em dólares da comporta
	Largura (m)	Altura (m)		
5,20	4,30	8,75	41 500	68 900
5,50	4,55	9,15	47 500	78 800
5,80	4,85	9,75	55 000	91 100
6,10	5,10	10,20	59 000	97 900
6,40	5,35	10,70	68 000	113 000
6,70	5,65	11,25	79 000	131 000

As guias da comporta para os vários tamanhos desta última, não variam apreciavelmente uma vez que a carga para qual a comporta for projetada não varia. Os pêsos estimados e o custo do engastamento do metal para as guias da comporta são dados na Tabela IX.

TABELA IX

Diâmetro da tubulação D (m)	Pêso das guias de metal engastadas na comporta (Kg)	Custo em dólares
5,20	16 600	12 800
5,50	16 730	12 900
5,80	16 860	13 000
6,10	17 040	13 150
6,40	17 220	13 300
6,70	17 400	13 420

Se para cada comporta de tubulação forçada fôr necessário um guincho, o custo total dêste, deverá ser acrescentado do custo da tubulação forçada. O tamanho do guincho aumenta com o tamanho da comporta, porém o mesmo não acontece com o custo, que contudo aumentará em proporção direta à capacidade de elevação. O custo dos guinchos de cabos para os vários tamanhos de tubulação são estimados na Tabela X.

TABELA X

Diâmetro da Tubulação D (m)	Custo em dólares do guincho da comporta
5,20	17 000
5,50	18 200
5,80	19 500
6,10	20 200
6,40	21 100
6,70	22 000

O custo das grades protetoras deve também ser somado ao da tubulação forçada. Contudo, assume-se que as mesmas grades protetoras sejam adequadas para tôdas tubulações forçadas consideradas. Seu peso é estimado ser de 59 000 kg e seu custo de \$ 30 000 (dólares).

CUSTO COMPARATIVO TOTAL

O custo total da tubulação forçada e peças auxiliares usadas para a comparação econômica será a soma do custo da tubulação de aço, do aço da armadura, dos suportes de montagem, da comporta, das guias da comporta, do guincho e das grades protetoras. Isto tudo está resumido na Tabela XI para os vários tamanhos de tubulação forçada.

TABELA XI

Custo em 1000 dólares						
	Diâmetros de tubulação forçada em metros					
	5,20	5,50	5,80	6,10	6,40	6,70
1) Tubulação de aço ..	167,0	193,0	223,0	254,0	286,0	325,0
2) Armadura	40,0	41,6	43,2	44,8	46,4	48,0
3) Apoios de montagem	8,1	8,2	8,2	8,3	8,5	8,8
4) Comporta da tomada	68,9	78,8	91,1	97,9	113,0	131,0
5) Guias da comporta .	12,8	12,9	13,0	13,1	13,3	13,4
6) Guicho da comporta	17,0	18,2	19,5	20,2	21,1	22,0
7) Grades protetoras ..	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Total, custo direto	343,8	382,7	428,0	468,3	518,3	578,2
Valor capitalizado da perda de energia	425,0	354,0	302,0	261,0	233,0	212,5
Custo Total comparativo	768,8	736,7	730,0	729,3	751,3	790,7

DIÂMETRO ECONÔMICO

Para obter-se o custo comparativo de cada alternativa, adiciona-se o valor capitalizado da energia perdida à soma dos custos diretos. Os totais assim obtidos estão marcados na fig. 3. O custo capitalizado da energia perdida está marcado também.

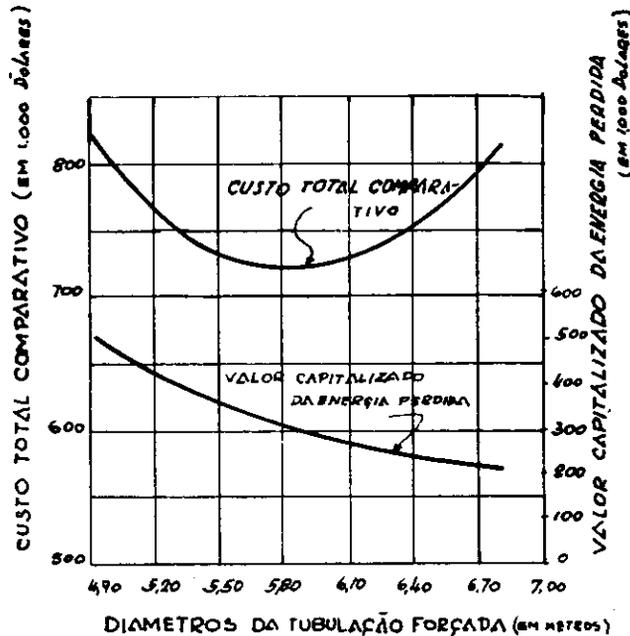


fig. 3

A curva do custo total achata-se no intervalo compreendido entre os diâmetros de 5,50 m e 6,10 m da tubulação forçada, com um mínimo no ponto correspondente ao valor 5,84 m, que portanto deve ser considerado o diâmetro de tubulação forçada mais econômico para esta instalação. A curva para o custo da energia perdida achata-se continuamente à medida que cresce o diâmetro da tubulação forçada, indicando que a redução de perda de energia pelo aumento do diâmetro da tubulação forçada além de 6,40 m não seria apreciável.

O diâmetro econômico da tubulação forçada obtido por esta análise detalhada e extensa, aproxima-se sensivelmente daqueles obtidos usando-se as três fórmulas empíricas diferentes. Esta semelhança atesta a utilidade das fórmulas empíricas baseadas em dados de instalações existentes ou em experiência. A análise de custo é contudo também dependente de um número de variáveis que devem ser escolhidas cuidadosamente, e seus valores devem ser certos e representativos das condições reais predominantes ou previstas durante a construção e operação da instalação.

Quando os dados escolhidos para os vários componentes verdadeiramente traduzem as condições reais, a análise detalhada será correta e de grande valor. Nos casos em que fatores tais como o custo de instalação, os diferentes tipos de equipamento, o fator de carga, ou a vida desejada da instalação, não forem considerados razoavelmente exatos, o projetista pode ser levado a desprezar os resultados das análises de custo detalhadas e confiar em fórmulas empíricas comprovadas. O tamanho da tubulação forçada assim determinado, não estaria muito afastado do verdadeiro diâmetro econômico.

REFERÊNCIAS

- 1) "PENSTOCKS SIZED QUICKLY" de G. S. Sarkaria, Engineering News — Record, August 15, 1957.
- 2) "STEEL PENSTOCK SELECTION" de A. E. Niederhoff, Western Construction News, April 1, 1943.
- 3) "WELDED STEEL PENSTOCKS DESIGN AND CONSTRUCTION" de P. J. Bier, Engineering Monograph N.º 3, U. S. Bureau of Reclamation, July 1949.