DETERMINAÇÃO DAS PERDAS DE CARGA

No projeto de uma instalação de bombeamento e da rede de distribuição de água de um prédio, é imprescindível calcular-se a energia que o líquido irá despender para escoar no encanamento, isto é, a perda de carga no encanamento.

Esta grandeza é fundamental no cálculo da potência de uma bomba e em todas as questões relacionadas com o escoamento de líquidos em encanamentos.

A perda de carga, ou de energia, resulta do atrito interno do líquido, isto é, de sua viscosidade, da resistência oferecida pelas paredes em virtude de sua rugosidade e das alterações nas trajetórias das partículas liquidas impostas pelas peças e dispositivos intercalados no encanamento.
Darcy e Weisbach chegaram à expressão geral da perda de carga válida para qualquer líquido, a qual é empregada no chamado método moderno ou racional, e que pode ser escrito sob a forma

$$J = f \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Nesta expressão, vê-se que a perda de carga J varia:

— diretamente com o comprimento l do encanamento e o quadrado da velocidade de escoamento v;

— inversamente com as dimensões da seção de escoamento e, portanto, com o diâmetro *d*.

Varia diretamente também com um fator *f* chamado *fator de resistência ou coeficiente de atrito*.

O regime de escoamento no bombeamento e distribuição de água é do tipo denominado "regime turbulento", com distribuição das velocidades de escoamento de modo relativamente uniforme ao longo de cada seção transversal de escoamento. Demonstra-se que nesse regime de escoamento o fator *f* de perda de carga depende:

— da rugosidade relativa das paredes do encanamento, isto é, de $\frac{\varepsilon}{d}$, sendo ε a rugosidade absoluta das paredes e *d* o diâmetro interno do encanamento. Esses valores encontram-se nos livros de Hidráulica e são tabelados em função da natureza do material do encanamento, de seu diâmetro e do tempo de uso;

— do número de Reynolds R , o qual é dado por

$$R_e = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

onde,

v = velocidade média na seção onde se escolheu a dimensão d($m.s^{-1}$)

d = dimensão linear, característica do dispositivo onde se processa o escoamento, por exemplo, o diâmetro interno de um tubo (m);

v= coeficiente de viscosidade cinemática, grandeza que caracteriza a viscosidade, ou seja, o atrito intermolecular do líquido.

Para a água a 15°C, v = 0,000001127 $m^2 \cdot s^{-1}$ correspondente a 1,12 Centistokes, e na temperatura de 20°C v = 0,000001007, correspondente a 1,00 Centistokes.

No regime turbulento, R > 4.000.

Existem dois conhecidos diagramas que permitem obter o fator de resistência ou de atrito *f*, e que se baseiam nos ensaios de Blasius, Nikuradse, Colebrook e White e nas análises matemáticas de Prandtl e Kárinán.

a) *Diagrama de Moody* (Fig. 01). Entrando-se com o valor do número de Reynolds e a rugosidade relativa ε/*d* obtém-se imediatamente o valor do coeficiente de perda de carga *f*.

b) *Diagrama de Hunter-Rouse* (Fig. 02), com os valores do número de Reynolds e as curvas correspondentes a *d* / ε (inverso da rugosidade relativa) acham-se os valores de *f*.

Achado o valor def calcula-se a perda de carga J pela mencionada fórmula.

$$J = f \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Esses diagramas, que nenhum livro de Hidráulica dispensa, são universais, isto é, prestam-se a líquidos de qualquer viscosidade e qualquer regime de escoamento, seja ele laminar (Re < 2.000); de transição (R entre 2.000 e 4.000) e turbulento (Re > 4.000), podendo ser utilizados para encanamentos, quaisquer que sejam suas rugosidades.

Fica assim evidenciada a utilidade do emprego desses gráficos, notadamente em instalações industriais, onde o escoamento de líquidos de elevada viscosidade se realiza muitas vezes em regime laminar.

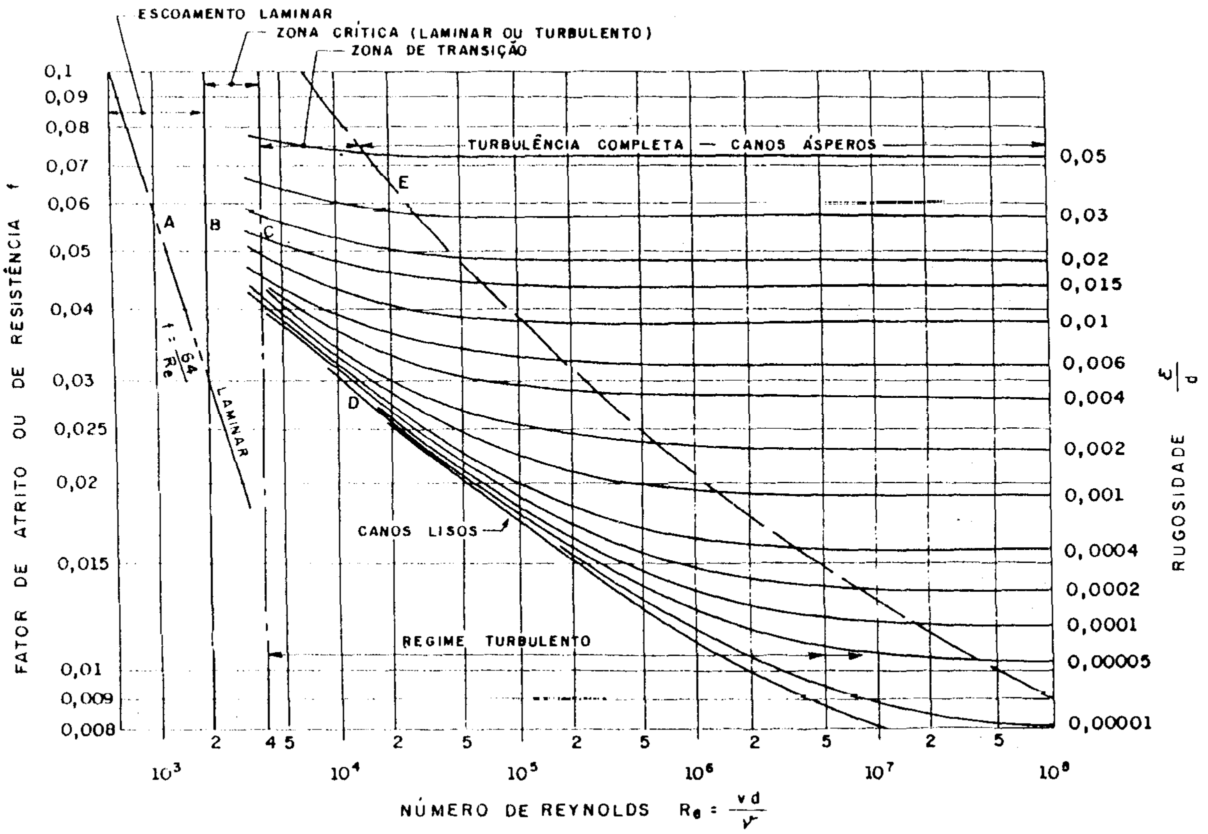


Fig. 01 Diagrama de Moody para determinação do coeficiente *f* de perda de carga.

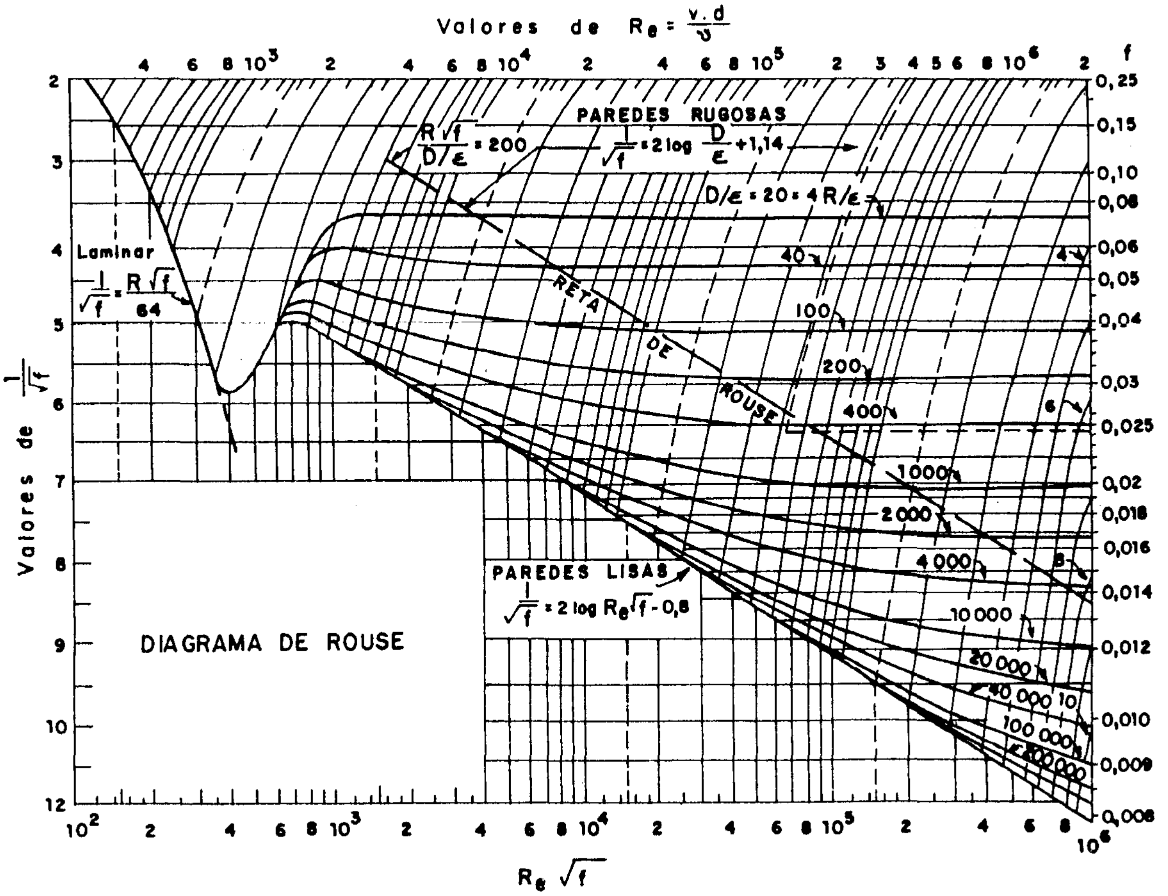


Fig.02 Diagrama de Rouse para determinação do coeficiente *f* de perda de carga.

Para as condições normais da água fria potável, podemos adotar para a rugosidade ε e o coeficiente de atrito *f* os valores na Tab. 1 indicados, correspondendo os menores valores de *f* aos tubos de maior diâmetro.

Na prática corrente de instalações de abastecimento e distribuição de água e nas instalações prediais, recorre-se quase sempre a fórmulas empíricas aplicáveis cada qual a um determinado tipo de material de encanamento.

Podemos neste caso dividir o cálculo da perda de carga em duas partes:

— Perda de carga normal, ou seja, ao longo de um encanamento retilíneo, com diâmetro constante.

— Perda de carga devido às conexões, peças especiais, válvulas, entrada e saída de reservatórios. *São as perdas de cargas acidentais ou localizadas.*

Vejamos como calcular essas perdas.

Tab. 1

Material do tubo	Rugosidade ε (mm)	Coeficiente de atrito *f*
Aço galvanizado novo		
— com costura	0,15 a 0,20	0,012 a 0,06
— sem costura	0,06 a 0,15	0,009 a 0,012
Ferro fundido		
— revestido com asfalto	0,3 a 0,9	0,014 a 0,10
— revestido com cimento	0,05 a 0,15	0,012 a 0,06
— usado (sem revestimento)	0,40 a 12,0	0,02 a 1,5
Cimento - amianto		
— novo	0,05 a 0,10	0,009 a 0,058
— usado	0,60	0,10 a 0,15
PVC e cobre	0,015	0,009 a 0,050

Perda de carga normal

Existem várias fórmulas e ábacos correspondentes que traduzem a dependência entre as grandezas Q, d, 1 e J, introduzindo coeficientes ou fatores empíricos que levam em conta a qualidade do material, a rugosidade do encanamento, portanto a idade do mesmo, e o tipo de revestimento interno.

A NBR-5626 recomenda o emprego das fórmulas de Flamant e de Fair-Whipple-Hsiao para cálculo das perdas de carga no dimensionamento de encanamentos.

A fórmula de Flamant (1892) para tubos de paredes lisas é

$$\frac{dJ}{4} = b\sqrt{\frac{v^7}{d}}$$

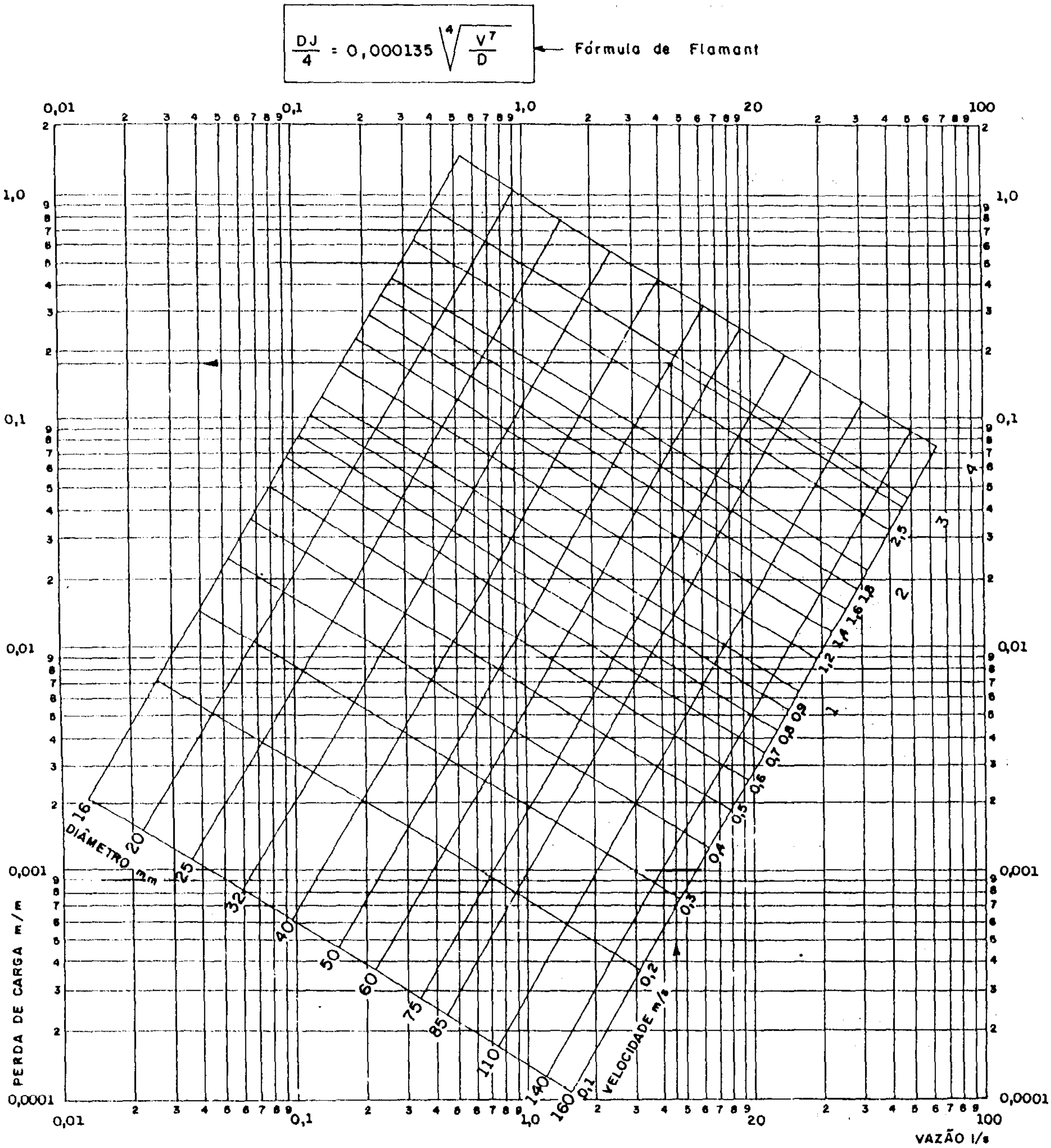


Fig 3. Ábaco da Companhia Hunsen Industrial, para cálculo de perdas de carga em encanamento de PVC rígido, para instalações prediais, série A.

onde
b = 0,00023 para tubos de aço e ferro fundido em uso
b = 0,000185 para os mesmos tubos, novos.

Pode-se utilizar o ábaco da Fig. 3, apresentado no catálogo da Companhia Hansen Industrial, quando se tratar do cálculo de perdas de carga em tubos de PVC rígido.
Exemplo:

Entrando-se no ábaco com Q = 4,51 s e diâmetro de 50 mm, obtém-se, para tubo de PVC rígido:
J= 0,18m/m
v= 2,8 **m.s^{-1}**

As fórmulas de Fair-Whipple-Hsiao (1930) são usadas para tubos de pequenos diâmetros, até 4"(100mm). Temos:
— tubo de ferro galvanizado

$$Q = 27{,}113 \cdot J^{0{,}632} \cdot d^{2{,}596}$$

ou

$$J = 0{,}002021 \frac{Q^{1{,}88}}{d^{4{,}88}}$$

— **tubo de cobre e latão conduzindo água fria**

$$Q = 55{,}934 \cdot d^{2{,}714} \cdot J^{0{,}571}$$

ou

$$J = 0{,}0086 \frac{Q^{1{,}75}}{d^{4{,}75}}$$

— tubo de cobre e latão conduzindo água quente

$$Q = 63{,}281 \cdot d^{2.714} \cdot J^{0.571}$$

Os ábacos de autoria do ilustre engenheiro Murilo S. Pinho, referentes às fórmulas de Fair-Whipple-Hsiao, são de uso corrente. Entrando-se no ábaco de pontos alinhados com duas grandezas e ligando-as por uma reta, obtêm-se as outras duas. Assim, no caso do tubo de ferro galvanizado, se entrarmos, por exemplo, com a descarga com um valor Q = 4,5 **l.s^{-1}** e diâmetro d = 50 mm, ligando os pontos nos eixos verticais respectivos por uma reta, obteremos na Fig. 04 as grandezas

J =0,165m/m e v =2,2 **m.s^{-1}**

Se o tubo for de cobre, ou de PVC rígido, teremos, na Fig. 05,

J =0,l0 m/m

v =2,25 **m.s^{-1}**

Para diâmetros acima de 50 mm (2”), o Prof. J.M. de Azevedo Netto recomenda a fórmula de Hazen-Williams (1903- 1920)

$$v = 0{,}355 \cdot C \cdot d^{0{,}63} \cdot J^{0{,}54} \qquad \text{ou} \qquad Q = 0{,}278531 \cdot C \cdot d^{2{,}63} \cdot J^{0{,}51}$$

onde

C = 125 — aço galvanizado com costura
C = 130 — aço soldado, novo
C = 110 — aço soldado, com 10 anos de uso
C = 90 — aço soldado com 20 anos de uso
C = 75 — aço soldado com 30 anos de uso
C = 130 — aço soldado com revestimento especial
C = 130 — cobre e latão
C = 120-130 — ferro fundido com revestimento de cimento ou epóxi
C = 100 — ferro fundido após 15 a 20 anos
C = 90 — ferro fundido, usado
C = 125 — PVC até 50 mm de diâmetro
C = 135 — PVC de 75 e 100 mm
C = 140 — PVC com mais de 100 mm de diâmetro
C = 130 — cimento-amianto

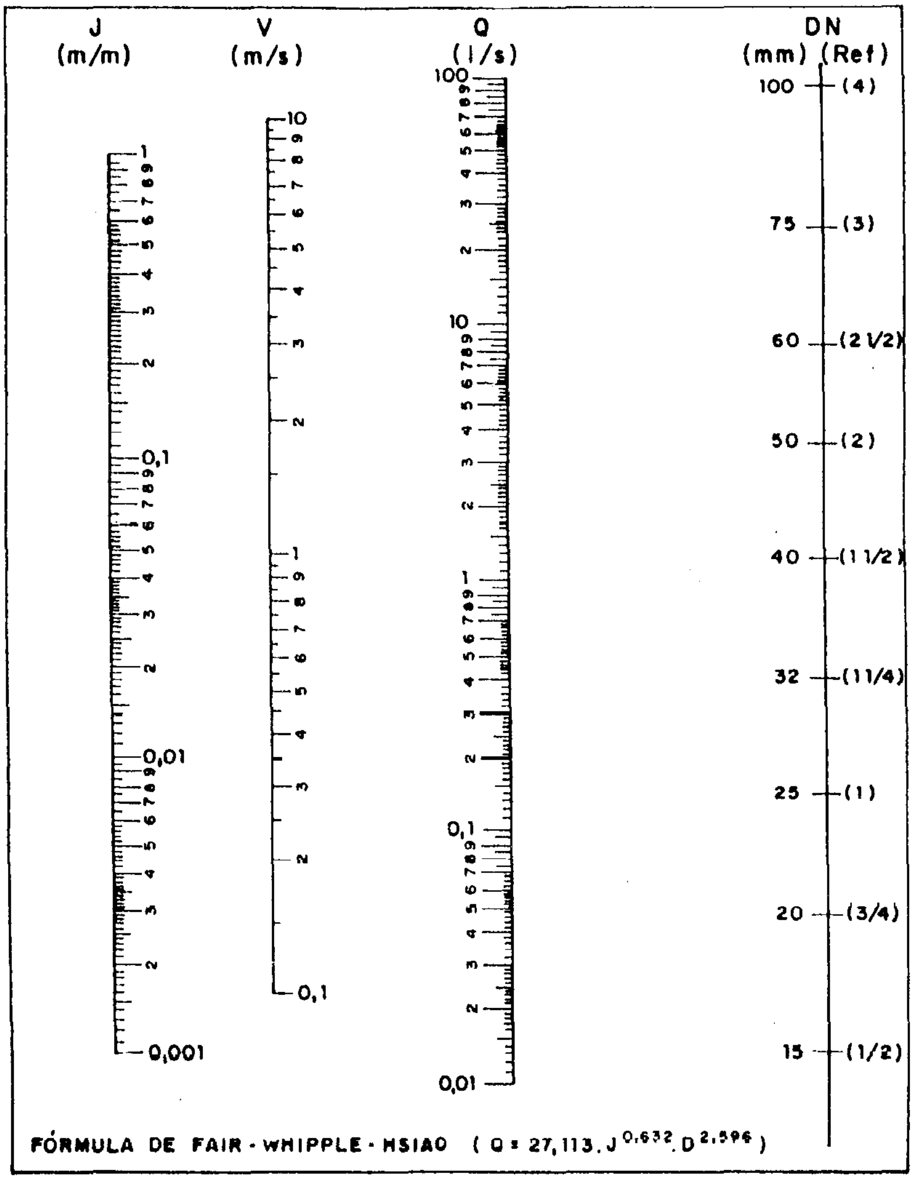


Fig1.04 Ábaco de Fair-Whipple-Hsiao para tubulações de aço galvanizado e ferro fundido.

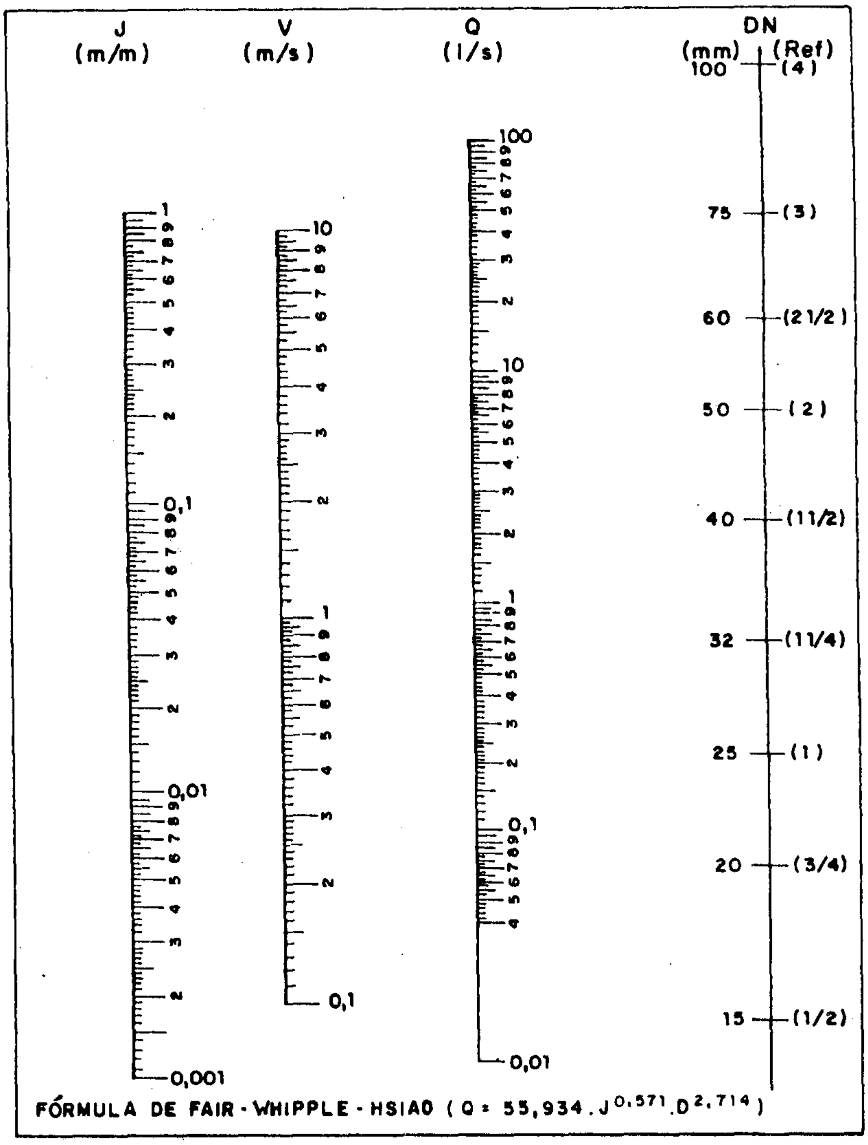


Fig. 05 Ábaco de Fair-Whipple-Hsiao para tubulações de cobre e plástico.

Usa-se também calcular a perda de carga ***J*** pela fórmula de Hazen-Williams, sob a forma:

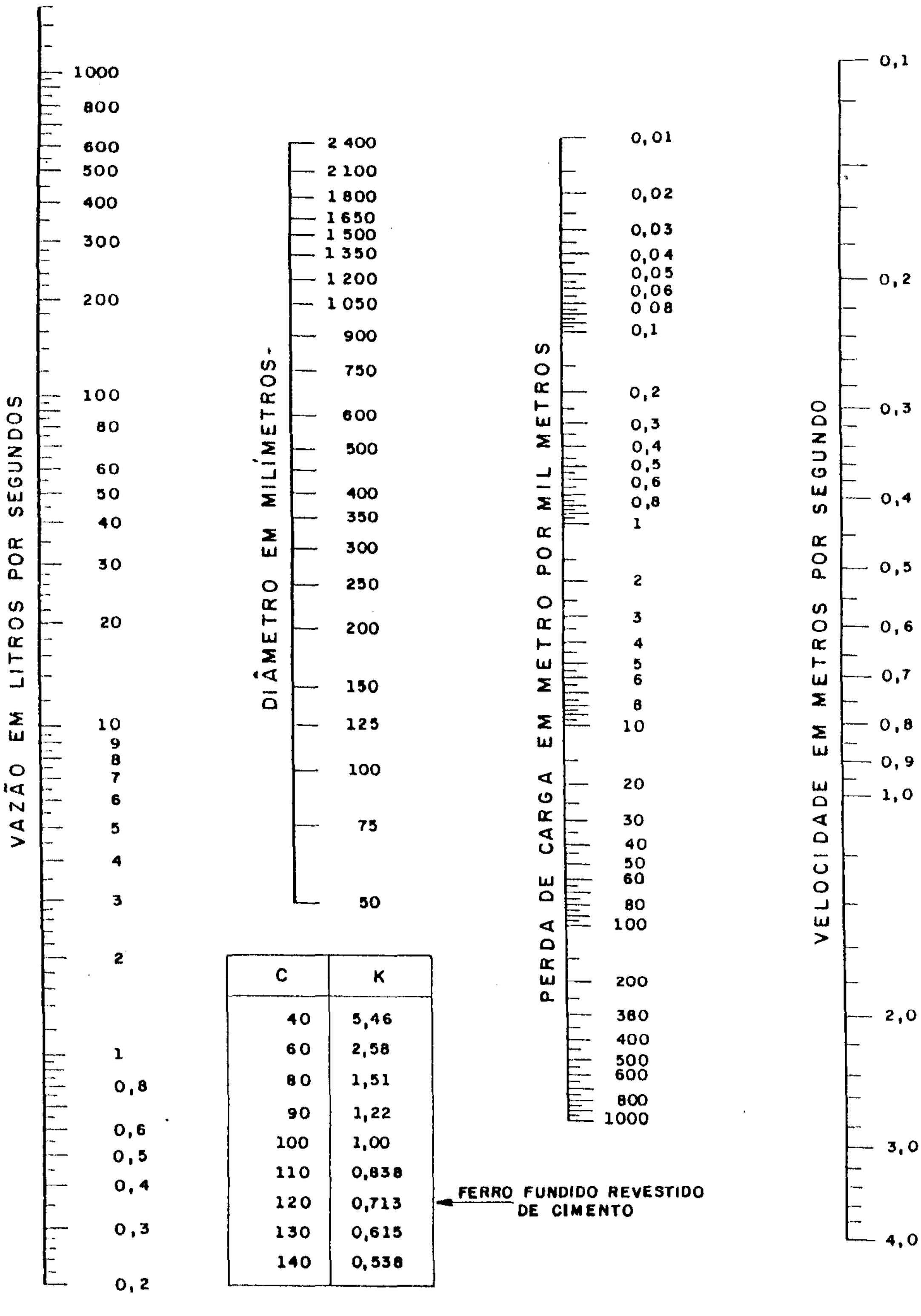
$$J = \beta \cdot \frac{Q^{1.85}}{d^{4.87}}$$

Q — m³.s⁻¹
d — m
J — m/m

A equivalência entre β e C é a seguinte:

$$\boxed{\beta = \frac{10{,}641}{C^{1{,}85}}}$$

C	75	90	100	125	130	135	140
β	0,00362	0,00258	0,00212	0,00141	0,00131	0,00121	0,00114



C	K
40	5,46
60	2,58
80	1,51
90	1,22
100	1,00
110	0,838
120	0,713
130	0,615
140	0,538

Fig. 06 Ábaco baseado na fórmula de Williams-Hazen, para C = 100, de autoria do Prof. José Augusto Martins, da Escola Politécnica da Universidade de SP. Para C ≠100, multiplicar a perda de carga pelo valor de K correspondente.

Exemplo: Para urna descarga de 100 **l.s**$^{-1}$ tubo de 45 cm de diâmetro, no ábaco da Fig.07, encontramos a velocidade de 70 **cm.s**$^{-1}$, e admitindo o coeficiente C = 103, achamos 175 cm/km para a perda de carga, ou seja, 1,75 m/1000m.

Perdas de carga localizadas

Além da perda de energia ocorrida ao longo do encanamento, as peças especiais, conexões, válvulas etc. também são responsáveis por perdas de energia, por causarem turbulência, alterarem a velocidade, mudarem a direção dos filetes, aumentarem o atrito e provocarem choques das partículas líquidas.

Essas perdas, localizadas onde existem as peças mencionadas, são, por isso, chamadas *locais, localizadas ou acidentais*.

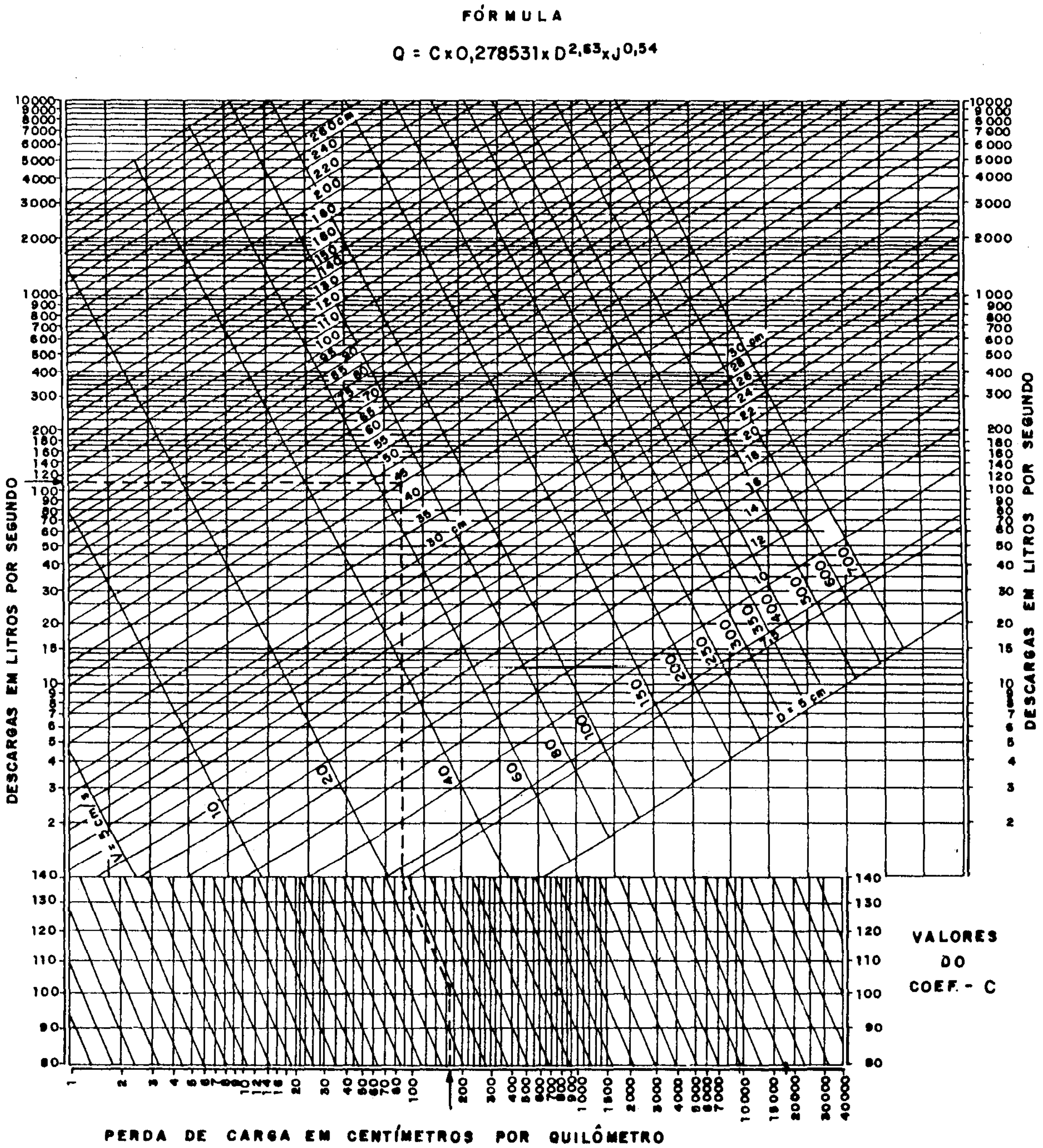


Fig. 07 Ábaco para o cálculo das tubulações pela fórmula de Williams-Hazen.

Ao ser calculada a perda de carga de um encanamento, deve-se, portanto, adicionar à perda de carga normal, isto é, ocorrida ao longo do encanamento, as perdas de carga correspondentes a cada uma dessas peças, conexões e válvulas.

Há vários métodos para se calcular essas perdas:

1º Utilização da *fórmula geral* das perdas localizadas e de tabelas onde se encontram valores do coeficiente *K* de perdas localizadas, para várias peças e conexões. A perda de carga localizada correspondente a uma peça, cujo coeficiente de perda de carga tem o valor K, é calculada por

$$J = K \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Esta perda será expressa, por exemplo, em metros de coluna de água, de óleo etc., conforme o líquido.

2º *Métodos dos comprimentos equivalentes ou virtuais*

O método baseia-se no seguinte: cada peça especial ou conexão acarreta uma perda de carga igual à que produziria um certo comprimento de encanamento com o mesmo diâmetro. Este comprimento de encanamento equivale virtualmente, sob o ponto de vista de perda de carga, ao que produz a peça considerada.

Assim, um registro de gaveta de 3” (75 mm), todo aberto, dá a mesma perda de carga que 0,5m de tubo de aço galvanizado de 3”. Dizemos então que o comprimento equivalente ao registro de 3” todo aberto é de 0,5 m. Adicionando-se os comprimentos virtuais ou equivalentes de todas as peças ao comprimento real, teremos um comprimento total, final, que será usado como se houvesse apenas encanamento reto sem peças especiais e outras singularidades. O problema daí em diante é tratado como acabamos de ver para os encanamentos.

Corno este segundo método é muito prático e é recomendado na NBR-5626, limitar-nos-emos a ele, para não nos estendermos demais sobre o assunto.

Para a determinação dos comprimentos equivalentes podemos utilizar:

a) ***O ábaco da Crane Corporation*** **(Fig.08).**

Ligando-se por uma reta o ponto do eixo A, correspondente à peça em questão, ao diâmetro indicado no eixo B, obtém-se no eixo C o comprimento equivalente em metros.

Exemplo: Válvula de gaveta de 3” (75 mm) toda aberta.

Ligando os pontos **a** e **b**, obtemos em **c** o valor 0,52 m. Portanto, a perda de carga na válvula de gaveta de 3” equivale à que se verificaria em 0,52 m de encanamento de 3”.

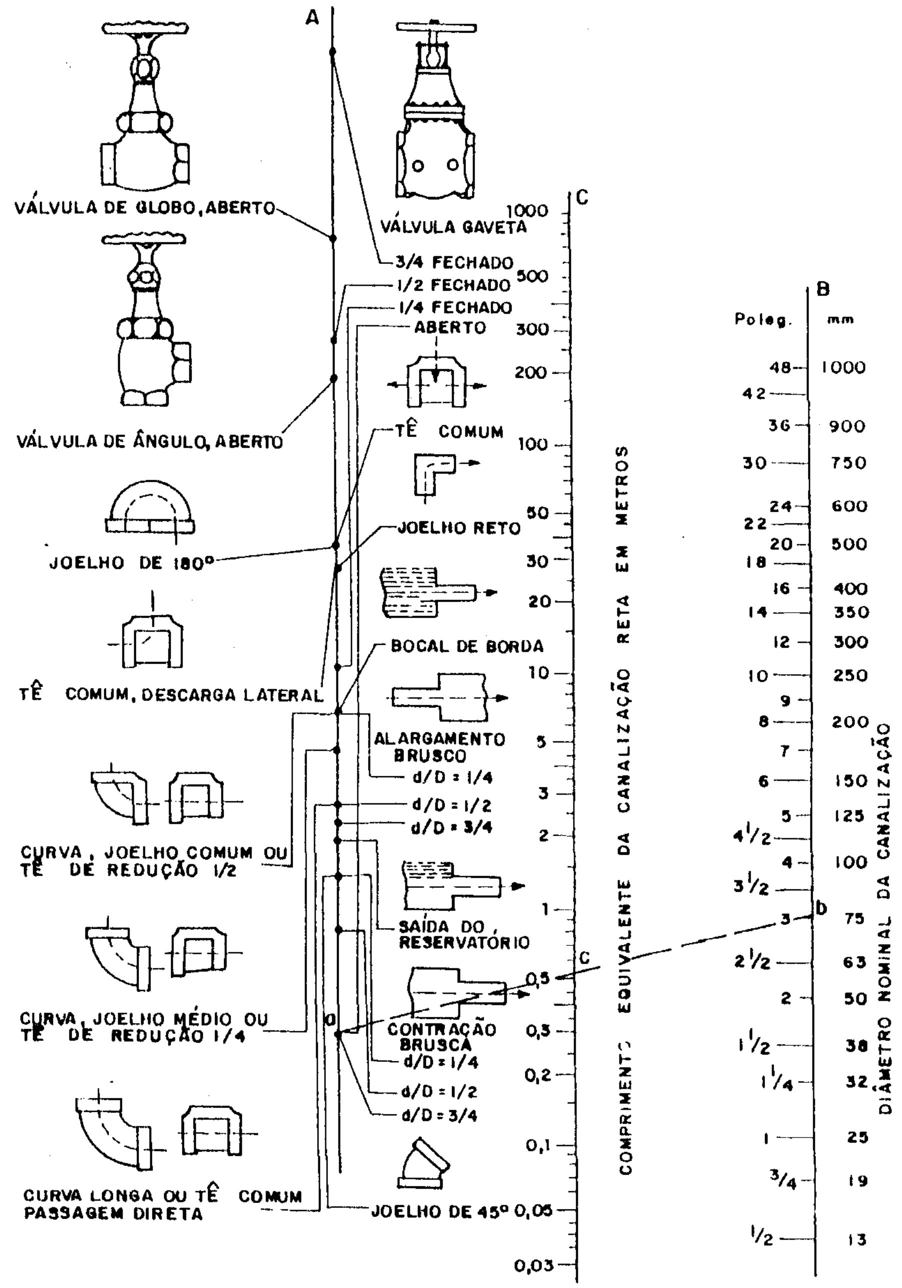


Fig. 08 Perdas de carga localizadas. (Gráfico da Crane Co.)

b) A tabela de comprimentos equivalentes.

Pode-se usar a tabela da Fig. 1.41 apresentada parcialmente na NBR-5626 e retirada de publicação da Crane Corporation.

Exemplo: Para o registro de gaveta 3", o comprimento equivalente é de 0,5m, valor praticamente igual ao encontra do pelo ábaco da Crane.

Observação: Para cada peça que se considera, vimos que a perda de carga que nela ocorre pode ser expressa em unidades de comprimento de tubo de igual diâmetro. Dividindo esse comprimento pelo diâmetro em questão teremos o número de diâmetros que somados dão o comprimento equivalente,

isto é, $\frac{L}{D}$ = nº de diâmetros.

Existem tabelas que dão os valores $\frac{L}{D}$ para várias peças, como a Tab. Fig.08. Multiplicando-se o valor do número de diâmetros pelo valor do diâmetro, obtém-se o comprimento equivalente. Este processo é usado em programação para computadores.

Tab. Fig.08

Tipo de peça	Número de diâmetro $\left(\frac{L}{D}\right)$
Cotovelo 90°	45
Cotovelo 45°	20
Curva longa 90°	30
Curva longa 45°	15
Alargamento gradual	12
Entrada em tubo	17
Redução gradual	0,6
Registro de gaveta aberto	8
Registro de globo aberto	350
Saída da tubulação	35
Tê saída lateral	65
Tê passagem direita	20
Válvula de retenção	100
Válvula de pé com crivo	250