

A DESCARGA LIVRE EM TUBOS CURTOS

Eng. JOSÉ M. DE AZEVEDO NETTO

Do Departamento de Águas e Esgotos de S. Paulo
Da Faculdade de Higiene e Saúde Pública da Universidade de S. Paulo.

1. Natureza do problema

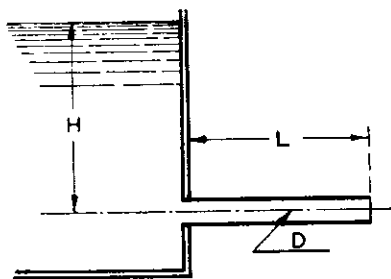
Um problema que se apresenta ao engenheiro com relativa frequência é o que diz respeito à determinação da vazão de tubos relativamente curtos sujeitos à descarga livre.

Para citar os exemplos mais comuns basta mencionar certos tipos de extravazores, canalizações para o esvaziamento de tanques, descargas de canalizações, boeiros, instalações industriais, etc.

Muito embora esse problema não exija tratamento complexo, a sua solução nem sempre tem sido bem posta pelos profissionais que dêle se ocupam.

Observa-se frequentemente a aplicação de fórmulas estabelecidas para as tubulações (encanamentos longos), sem os cuidados exigidos, pela particularidade do caso em questão.

Analisando-se o problema sob o aspecto mais geral encontra-se:



Para

- $L = 0$: Orifícios
- $L = D$: Orifícios
- $L = 2D$: Bocais
- $L = 3D$: Bocais.

FIG. 1

Quando o comprimento L ultrapassar um grande número de vezes o diâmetro D encontra-se o caso das tubulações:

$$L > nD.$$

Teoricamente o valor de n não deve ser inferior a 40 nos casos mais favoráveis, devendo exceder 250 nos casos mais comuns.

Merriman considerava o comprimento $500 \times D$ como limite inferior para as tubulações propriamente ditas.

2. Tubos muito curtos

De qualquer maneira, verifica-se a existência de uma certa gama de valores, compreendida entre $3 \times D$ e " nD ", que excede aos bocais e cujas condições não caracterizam as tubulações normais.

Para essa zona podem ser definidos os "*tubos muito curtos*".

Erros grosseiros podem resultar da aplicação descuidada de fórmulas obtidas para canalizações de grandes comprimentos a esses tubos muito curtos.

Enquanto que naquelas predominam os atritos ao longo das linhas, nestes prevalecem a energia convertida em velocidade e a perda de entrada.

A influência das diversas perdas nas tubulações em função da relação comprimento/diâmetro (L/D) pode ser evidenciada pelo quadro abaixo, de valores médios calculados para tubos de 0,30 m de diâmetro, com uma carga inicial de 30 metros:

Comprimento expresso em diâmetros	5	50	100	1 000	10 000
Carga de vol. (*)	62%	41%	29%	5%	0,5%
Perda na entrada	32%	20%	15%	2%	0,3%
Perda nos tubos	6%	39%	56%	93%	99,3%

(*) (Em termos da carga disponível H).

3. Perda de carga nos orifícios e bocais

No caso de um orifício a carga total equivale à energia de velocidade do jato acrescida da perda na saída:

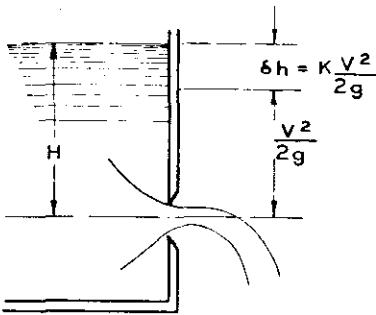


FIG. 2

$$H = \frac{V^2}{2g} + k \frac{V^2}{2g}$$

$$V^2 + k V^2 = 2g H$$

$$\therefore V = \frac{1}{\sqrt{1+k}} \sqrt{2gH}$$

E como:

$$V = C_v \sqrt{2gH}$$

$$C_v = \frac{1}{\sqrt{1+k}}$$

$$k = \frac{1}{C_v^2} - 1$$

$$\delta h = \left(\frac{1}{C_v^2} - 1 \right) \frac{V^2}{2g}$$

conhecida expressão que permite o cálculo da perda de carga em um orifício, em um bocal ou na entrada de uma canalização.

Tomando-se o valor prático para bocais, $C_v = 0,82$:

$$\delta h = \left(\frac{1}{0,82^2} - 1 \right) \frac{V^2}{2g} \cong 0,5 \frac{V^2}{2g}$$

4. Perdas nas tubulações retílineas

Tratando-se, porém, de um tubo ou de uma simples tubulação retílinea, além da perda localizada na entrada ($0,5 \frac{V^2}{2g}$), e da carga correspondente à velocidade ($\frac{V^2}{2g}$), existe ainda a perda por atrito ao longo das peças (h_f):

$$H = 0,5 \frac{V^2}{2g} + \frac{V^2}{2g} + h_f$$

$$H = 1,5 \frac{V^2}{2g} + \frac{f \cdot L \cdot V^2}{D \cdot 2g}$$

$$2g H = \left(1,5 + f \frac{L}{D}\right) V^2$$

$$\therefore V = \sqrt{\frac{2g H}{1,5 + f \frac{L}{D}}}$$

$$Q = S \cdot V = S \sqrt{\frac{2g H}{1,5 + f \frac{L}{D}}}$$

$$Q = \frac{S}{\sqrt{1,5 + f \frac{L}{D}}} \sqrt{2gH}$$

que também poderá ser escrita:

$$Q = \frac{S}{\sqrt{\frac{1}{C_v^2} + f \frac{L}{D}}} \sqrt{2gH}$$

Como

$$Q = C_d \cdot S \sqrt{2gH}$$

$$C_d = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{C_v^2} + f \frac{L}{D}}}$$

Os valores do coeficiente de atrito f variam com a velocidade média do líquido e com o diâmetro da canalização, para as mesmas condições de temperatura e de rugosidade das paredes.

O aumento de velocidade corresponde a um decréscimo no valor de f .

No caso de tubos muito curtos com descarga livre, a dificuldade reside na fixação do valor adequado de f , não somente porque ao se procurar determinar a vazão, a velocidade é desconhecida, como também devido ao fato de não se contar com valores experimentais correspondentes às grandes cargas e velocidades elevadas.

5. Condições de entrada nos tubos

Examinando-se as condições de entrada nos tubos sob o ponto de vista teórico, verifica-se que o regimen normal de escoamento somente é atingido após um certo percurso inicial.

Ao fim dêsse trecho de transição é que se pode encontrar uma distribuição de velocidades capazes de caracterizar um regimen de escoamento.

Daí a necessidade de se considerar os dois casos que ocorrem na prática:

Caso I — Escoamento em regimen laminar.

Caso II — Escoamento em regimen turbulento.

Nenhuma das fórmulas práticas estabelecidas para encanamentos a rigor poderia ser aplicada para as condições que prevalecem nesse trecho.

6. Escoamento em regimen laminar

Neste caso, se a secção de entrada no tubo fôr bem arredondada, de modo a evitar contrações, tôdas as partículas do líquido entrarão no tubo e começarão a escoar por êle com a mesma velocidade, excepção feita para uma camada muito pequena junto às paredes do tubo, e que sofrerá a sua influência.

Inicialmente, portanto, as partículas vão escoar praticamente com a mesma velocidade V , sendo $\frac{V^2}{2g}$ a energia cinética da massa.

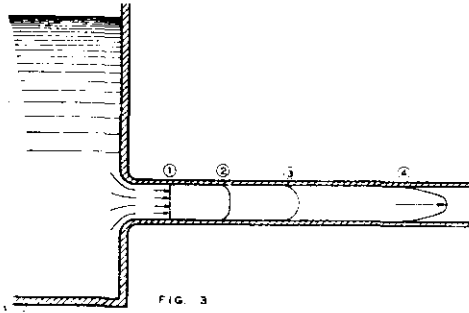


FIG. 3

À medida que as partículas forem escoando ao longo do tubo os filetes que ocupam a parte central vão tendo o seu movimento acelerado, ao passo que as partículas mais próximas das paredes ficam retardadas.

Como se trata de regimen laminar o perfil normal de velocidades é parabólico, e as condições de equilíbrio teoricamente, somente seriam atingidas após uma distância infinita.

Praticamente Prandtl e Tietjens indicam que o perfil de equilíbrio é obtido após um percurso:

$$L = 0,13 \Re . D.$$

Para $\Re = 1.800$, por exemplo (Numero de Reynolds):

$$L = 234 . D.$$

Com o escoamento laminar, isto é, com a distribuição parabólica de velocidades, a energia cinética será igual a $\frac{2V^2}{2g}$.

No percurso mencionado a energia cinética passará, portanto de $\frac{V^2}{2g}$ a $\frac{2V^2}{2g}$.

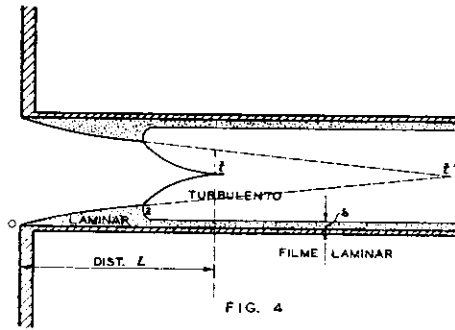
7. Escoamento em regimen turbulento

Com o escoamento turbulento as condições de regimen serão alcançadas mais rapidamente do que no caso anterior.

Teoricamente admite-se que a partir da aresta de entrada (o) constitua-se uma camada em que o escoamento é laminar, camada esta que vai se tornando mais espessa até um valor crítico z , a partir do qual a espessura se reduz repentinamente a um valor relativamente pequeno (δ), que se mantém constante (filme laminar).

Em z origina-se uma camada que limita o escoamento turbulento em regimen, e cuja espessura aumenta muito rapidamente.

No ponto em que convergem essas novas camadas (considerando o perfil de um tubo, conforme mostrado no desenho), as condições de regimen são atingidas em tôda a secção de escoamento.



As condições de equilíbrio neste caso são alcançadas após um percurso muito menor do que no caso anterior, podendo-se estimar em 20 a 40 diâmetros a contar do bordo de entrada.

Devido à curvatura acentuada do trecho zt o regimen estabelece-se muito mais rapidamente do que se verificaria para zt' .

8. Processo expedito de cálculo da vazão

A vista das dificuldades que se apresentam para tratamento do problema com o máximo rigor teórico, apresenta-se vantajoso para o engenheiro o processo expedito de cálculo que é objeto do presente trabalho.

A determinação da vazão de tubos muito curtos sujeitos à descarga livre pode ser feita, aplicando-se a expressão geral de descarga nos bocais:

$$Q = C_d \cdot S \sqrt{2gH}$$

em que:

Q = Vazão, em m^3/seg

S = Secção de escoamento (área útil do tubo), em m^2

g = $9,8 m/seg^2$

H = Carga inicial disponível, em m .

O coeficiente de descarga C_d (ou coeficiente de velocidade C_v) dependerá do comprimento relativo do tubo, isto é, de L/D .

Para orifícios em paredes delgadas:

$$\frac{L}{D} < 0,5 \dots\dots\dots C_d = 0,61.$$

Para os bocais êsse valor se eleva:

$$\frac{L}{D} = 2 \text{ a } 3 \dots\dots\dots C_d = 0,82.$$

Para os tubos muito curtos o valor de C_d vai decrescendo à medida que se eleva a relação L/D , em consequência da influência dos atritos interno e externo (parede dos tubos).

Eytelwein obteve os seguintes resultados com tubos novos de ferro fundido, de 0,30 m de diâmetro, ensaiados com uma carga inicial de 30 m:

$$\frac{L}{D} = 10 \dots\dots\dots C_d = 0,77$$

$$\frac{L}{D} = 20 \dots\dots\dots C_d = 0,73$$

$$\frac{L}{D} = 30 \dots\dots\dots C_d = 0,70$$

$$\frac{L}{D} = 40 \dots\dots\dots C_d = 0,66$$

$$\frac{L}{D} = 60 \dots\dots\dots C_d = 0,60.$$

Outras pesquisas foram conduzidas por Bazard e Fanning, há muitos anos.

9. Observações realizadas

Com o objetivo de investigar o problema o Autor recorreu a algumas experiências, tendo conseguido realizá-las numa das instalações do Departamento de Águas e Esgotos em São Paulo.

Essas observações, limitadas pelos recursos disponíveis no momento, são agora divulgadas com o principal objetivo de pôr o problema em foco.

Nos ensaios foram utilizados canos nacionais de aço galvanizado, com diâmetros nominais de $\frac{3}{4}$, 1, $1\frac{1}{2}$ e 2".

As observações feitas com tubos de 4" foram abandonadas devido às dificuldades de ensaio e imprecisão nas determinações.

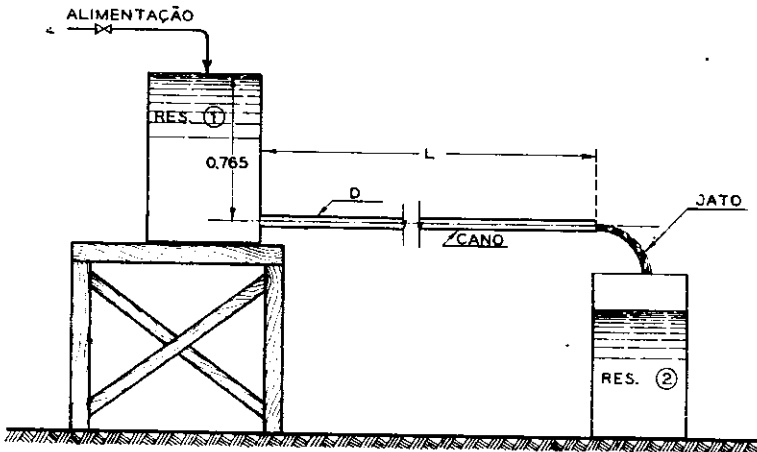


FIG. 5

A confecção da "entrada" normal mereceu certo cuidado mecânico, conforme se pode constatar pela fotografia anexa.

Os canos foram instalados em posição horizontal, descarregando água de um reservatório cilíndrico em um tambor metálico de volume conhecido, onde se fazia a medição direta da vazão.

O tempo sempre foi medido duas vezes, com precisão de 1 segundo, tomando-se a média aritmética das observações.

O reservatório principal foi alimentado por uma bomba centrífuga, exceção feita para algumas observações relativas aos canos de $\frac{3}{4}$ ", em que foi utilizada água da rede pública.

A temperatura da água foi verificada em todos os ensaios, com precisão de $0,5^{\circ}\text{C}$.

Os dados relativos às medições feitas encontram-se condensados no Quadro I.

O Quadro II compreende os resultados constatados, os quais são apresentados com interpolação gráfica no Quadro III, que também inclui os valores da mediana (Md).

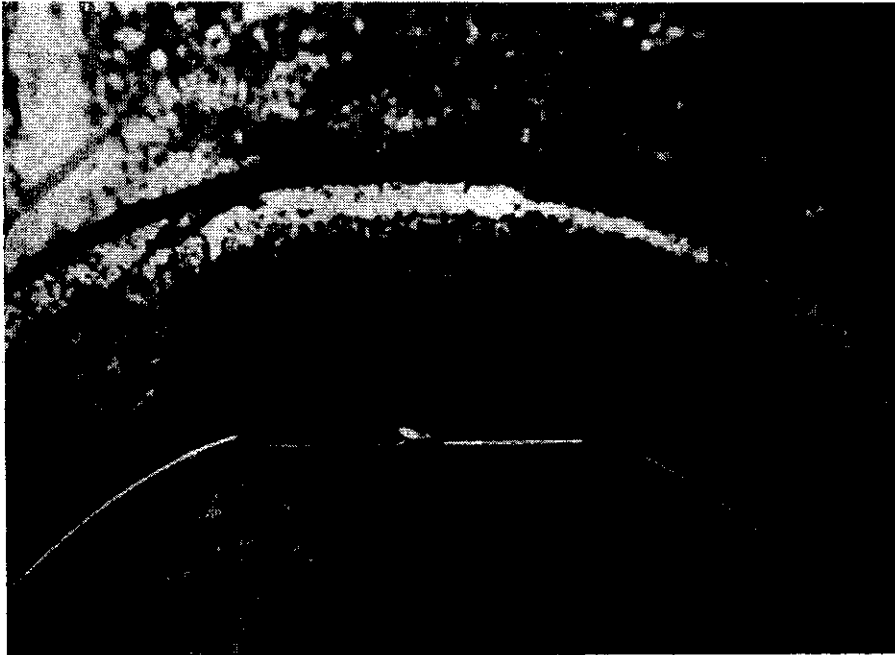
Finalmente o Quadro IV apresenta os valores práticos disponíveis, de Bazard, Eytelwein e Fanning, comparados aos dados obtidos (Md).

Os resultados encontrados estão também mostrados em um diagrama semi logarítmico onde podem ser melhor apreciados os afastamentos das observações.

10. Conclusões e Agradecimentos

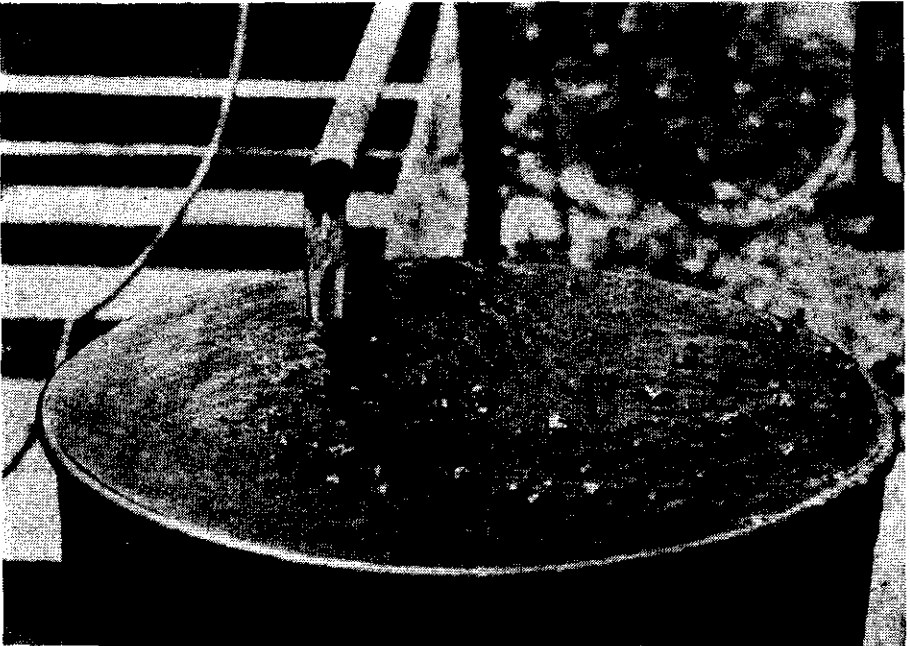
A investigação do assunto em consideração e o reexame crítico dos resultados encontrados parecem indicar a existência de um campo aberto para novas investigações de grande valor prático.

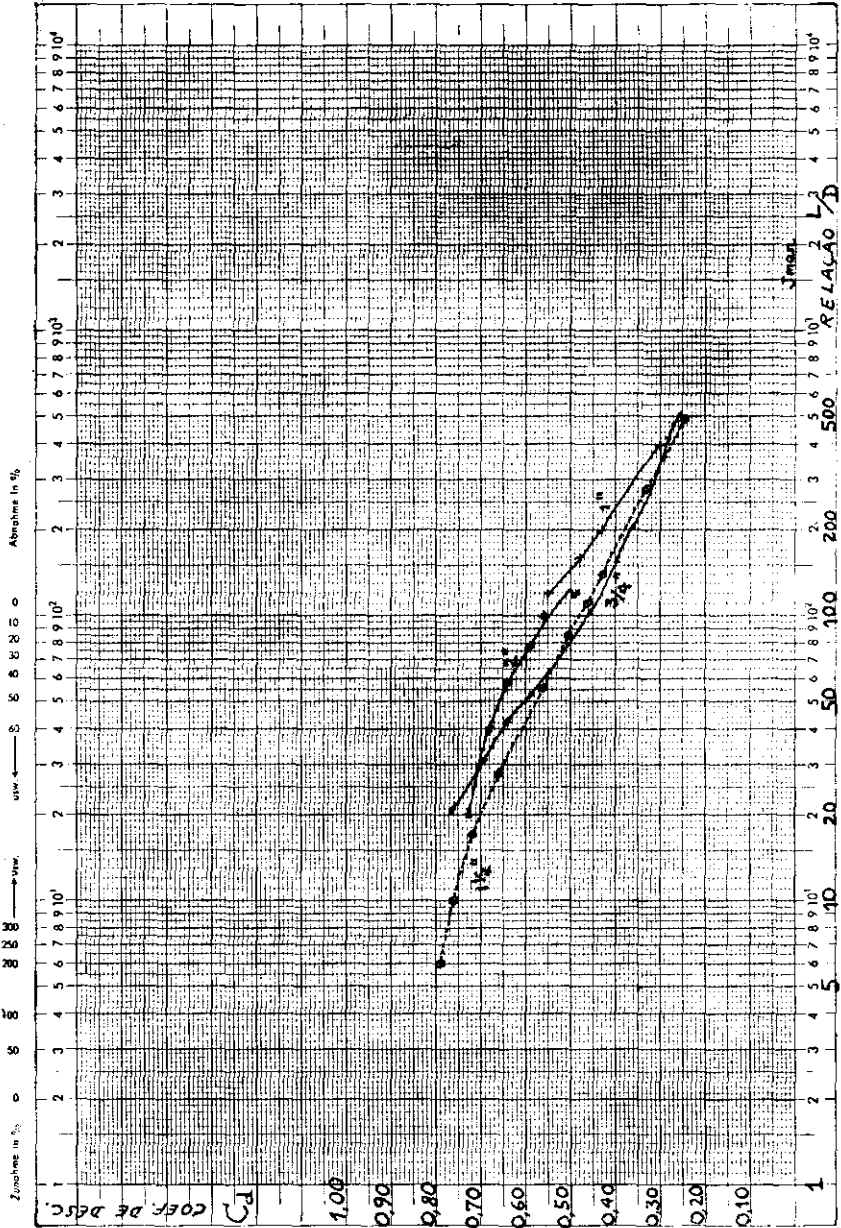
O Autor agradece a colaboração recebida do Eng. Cláudio Manfrini e reconhece a grande dedicação ao trabalho demonstrada pelo Sr. João Eudócio de Faria.



REFERÊNCIAS

- Azevedo Netto, J. M., "Manual de Hidráulica", São Paulo, 1954.
- Bazard, "Mecanique Industrielle", Paris.
- Daugherty, R. L., "Hydraulics", New York, 1937.
- Fanning, J. T., "Hydraulic and Water Supply Engineering". New York, 1895.
- Flinn, A. D., R. S. Weston, C. L. Bogert, "Waterworks Handbook", New York, 1916.
- Merriman, Mansfield & Thaddeus, "Treatise on Hydraulics", New York, 1914.
- Prandtl, L., "Guide a travers la Mécanique des fluides", trad. A Monod, Paris, 1952.
- Rouse, H., "Engineering Hydraulics", New York, 1949.
- Santos, Lúcio José, "Hydrotécnica", Belo Horizonte, 1925.





Eine Achse logarith. geteilt von 1 bis 1000. Einheit 62.5 mm, die andere in mm mit Prozenmaßstab

Nr. 369 1/2 6

Copyright 1938 by The McGraw-Hill Companies, Inc.



QUADRO III — COEFICIENTES DE DESCARGA C_d

L/D	3/4"	1"	1 1/2"	2"	M_d
500	0,26	0,28	0,25		0,26
400	0,28	0,30	0,28		0,28
300	0,31	0,36	0,33		0,33
200	0,36	0,43	0,39		0,39
150	0,40	0,50	0,42	...	0,42
100	0,46	...	0,47	0,55	0,47
90	0,49		0,49	0,57	0,49
80	0,52		0,51	0,59	0,52
70	0,54		0,53	0,61	0,54
60	0,56		0,55	0,63	0,56
50	0,58		0,57	0,66	0,58
40	0,64		0,62	0,68	0,64
30	0,70		0,66	0,70	0,70
20	0,76		0,71	0,73	0,73
15	...		0,73
10	...		0,76

QUADRO IV — VALORES PRÁTICOS COMPARADOS

L/D	M_d (*)	Bazard	Eytelwein	Fanning (**)
300	0,33			0,38
200	0,39			0,44
150	0,42	...		0,48
100	0,47	0,50		0,55
90	0,49	0,52		0,56
80	0,52	0,54		0,58
70	0,54	0,57	...	0,60
60	0,56	0,60	0,60	0,62
50	0,58	0,63	0,63	0,64
40	0,64	0,66	0,66	0,67
30	0,70	0,70	0,70	0,70
20	0,73	0,73	0,73	0,73
15	...	0,75	0,75	0,75
10	...	0,77	0,77	0,77

(*) Autor.

(**) Valores obtidos com tubos de ferro fundido de $D = 0,30$ m.