

# Medidor de vazão proporcional

ENG<sup>o</sup> JOSÉ AUGUSTO HUEB (1)  
ENG<sup>o</sup> ANDERSON PEDRO KAPPAZ (2)

## 1. INTRODUÇÃO

A viabilidade de implantação de sistemas de micromedicação está estreitamente ligada ao custo dos equipamentos a instalar, à compatibilidade que deve existir entre o grau de tratamento das variáveis a medir, à quantificação dessas variáveis e aos recursos humanos disponíveis para utilizar os dados e manter os equipamentos.

O atendimento dessa compatibilidade exige que haja em disponibilidade no mercado nacional ou nas próprias empresas estatais de saneamento, equipamentos adequados e compatíveis com o seu uso.

Contribuindo para aumentar a disponibilidade para as empresas de saneamento, de equipamentos medidores de vazão, o presente trabalho apresenta um processo simples, de baixo custo e suficientemente preciso para utilização em sistemas de abastecimento de água.

Consiste na instalação de uma canalização secundária, provida de hidrômetro de baixa vazão característica, em paralelo com uma singulari-

dade que provoque pressão diferencial em determinados pontos da massa fluida.

Tal pressão diferencial induz escoamento através da canalização secundária, cuja vazão, medida pelo hidrômetro, é diretamente proporcional à vazão total na seção de controle.

O medidor proporcional pode ser dimensionado, instalado, operado e mantido de forma simples, sendo que seus equipamentos componentes são nacionais, de fácil aquisição e baixo custo.

Essas características assumem extraordinária importância na atual conjuntura, podendo viabilizar a implantação de sistemas de macromedicação em praticamente todos os sistemas de abastecimento de água onde sejam exigidos tais recursos.

## 2. CRITÉRIOS CONSTRUTIVOS E TEORIA

É muito comum ocorrer em uma tubulação, uma singularidade qualquer que provoque uma pequena perda de carga e uma pressão diferencial entre duas seções transversais vizinhas, à montante e jusante respectivamente. Desde que tal singularidade esteja suficientemente afastada de outras singularidades, pode-se correlacionar a vazão que passa através da mesma, com a raiz quadrada da pressão diferencial existente entre pontos das duas seções transversais mencionadas. Interligando-se os dois pontos das seções transversais respectivas, por meio de um

conduto provido de hidrômetro de velocidade, parte da vazão total passará a escoar através do hidrômetro. Conforme será visto, a vazão total, dentro de limites de precisão aceitáveis, linearmente proporcional à vazão medida no hidrômetro.

A seguir serão deduzidas relações matemáticas entre a vazão no conduto principal e a vazão do conduto em Shunt, considerando vários tipos de deprimgêneos ou singularidades.

### 2.1. DIAFRAGMA

Consideremos o esquema da Fig. 1.

Se aplicarmos o teorema de Bernoulli entre as seções ① e ② chamando  $V_1$  a velocidade média na seção ① e  $V_2$  a velocidade média na seção ②,  $V_{1T}$  e  $V_{2T}$  as velocidades médias teóricas nas seções ① e ②, que ocorreriam caso não houvessem perdas, teremos:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \quad (a)$$

A equação da continuidade, sendo válida tanto para velocidades reais como teóricas, permite escrever:

$$V_{1T} \cdot S_1 = V_{2T} \cdot S_c, \text{ sendo}$$

$S_c$  a área da seção contraída. A relação  $C_c = \frac{S_c}{S_1}$  define um coeficiente de contração da veia líquida, que

(1) Chefe do Departamento de Apoio e Controle da Produção da Superintendência de Produção da Diretoria de Operação da Região Metropolitana - SABESP.

(2) Engenheiro do Departamento de Apoio e Controle da Produção da Diretoria de Operação da Região Metropolitana - SABESP.

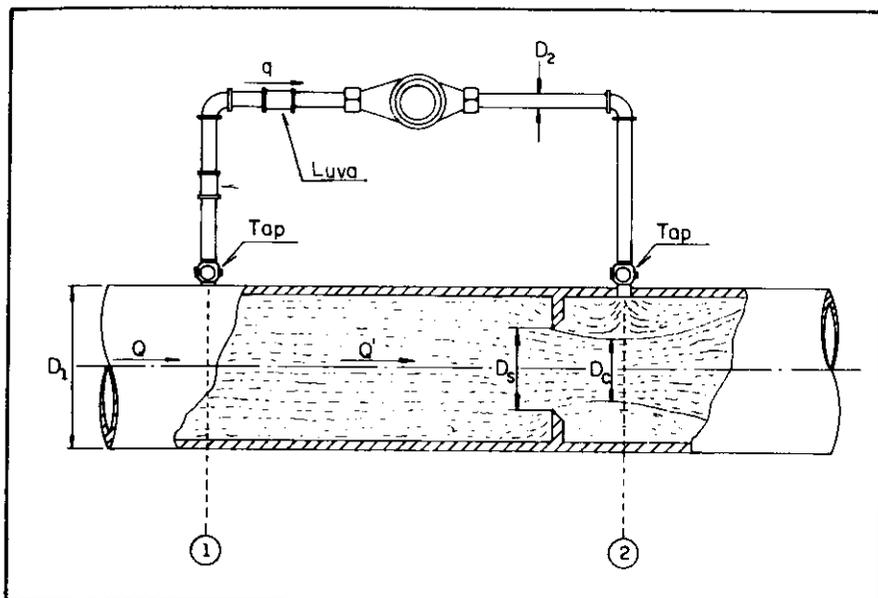


FIG. 1

levado à equação da continuidade fornece:

$$V_{1T} \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \cdot V_{2T} \cdot C_c \quad (b)$$

Levando (b) em (a), teremos:

$$V_{2T} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{D_2^4 \cdot C_c^2}{D_1^4}}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta P} \quad (c)$$

onde  $\Delta P$  é a pressão diferencial entre as seções ① e ② expressa em altura de coluna líquida,  $\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{\gamma}$  ( $\gamma$  = peso específico da água).

A velocidade real  $V_2$  seria uma fração da velocidade  $V_{2T}$ , definida por  $C_v$  (coeficiente de velocidade):  $C_v = \frac{V_2}{V_{2T}}$

Substituindo em (c) vem:

$$V_2 = \frac{C_v}{\sqrt{1 - \frac{D_2^4 \cdot C_c^2}{D_1^4}}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta P}$$

Como  $Q' = S_c \cdot V_2 = S_s \cdot C_c \cdot V_2$ , teremos:

$$Q' = \frac{S_s \cdot C_c \cdot C_v}{\sqrt{1 - \frac{D_2^4 \cdot C_c^2}{D_1^4}}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta P}$$

Chamando  $C_c \cdot C_v = \mu$  (coeficiente de vazão), vem:

$$Q' = \frac{\mu \cdot S_s}{1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4 \cdot C_c^2} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta P}$$

Chamando  $m = \frac{D_2^2}{D_1^2}$

e fazendo  $\frac{\mu}{\sqrt{1 - m^2 \cdot C_c^2}} = \alpha$

podemos escrever:

$$Q' = \alpha \cdot S_s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta P} \quad (1)$$

onde  $\alpha$  é um número obtido experi-

mentalmente, em função de  $m$ , para um dado diafragma.

Examinemos agora, o escoamento que se realiza na canalização em paralelo ao diafragma, a qual está acoplado o hidrômetro. A soma das perdas ocorrem entre as seções ① e ②, é igual à pressão diferencial  $\Delta P$  da equação (1).

$$(d) \Delta P = \left(\frac{\alpha}{11.1}\right) \lambda_1 + h_f + \lambda_H$$

onde se tem:

a) Perdas localizadas:

$$\lambda_H + \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad \text{sendo:}$$

I)  $\lambda_H$  : perda localizada devido ao hidrômetro

(e)  $\lambda_H = h_H \cdot \frac{V^2}{2g}$  (expressão geral das perdas localizadas)

II)  $\sum_{i=1}^n \lambda_i$  : soma das perdas localizadas, devidas às singularidades existentes, tais como cotovelos, registros, etc.

Podem-se escrever:

$$(f) \sum_{i=1}^n \lambda_i = \sum_{i=1}^n k_{si} \cdot \frac{V^2}{2g} = \frac{V^2}{2g} \sum_{i=1}^n k_{si}$$

b) Perdas distribuídas:

Podem ser calculadas pela Fórmula Universal:

$$(g) h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \text{onde } D = D_2$$

$L$  é o comprimento efetivo de conduto uniforme e  $f$  o coeficiente de atrito, dado, por exemplo, pelo ábaco de Moody.

Levando (e) (f) (g) em (d) vem:

$$\Delta P = \frac{V^2}{2g} \left( h_H + f \cdot \frac{L}{D_2} + \sum_{i=1}^n k_{si} \right)$$

onde  $v = \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot D_2^2}$  Logo:

$$q = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4 \sqrt{h_H + f \cdot \frac{L}{D_2} + \sum_{i=1}^n k_{si}}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta P} \quad (2)$$

Dividindo membro a membro (1) e (2) vem:

$$\frac{Q'}{q} = \frac{\alpha \cdot D_2^2}{D_2} \cdot \sqrt{h_H + f \cdot \frac{L}{D_2} + \sum_{i=1}^n k_{si}}$$

Como  $Q = Q' + q$ , vem:

$$Q = q \left( 1 + \frac{\alpha \cdot D_2^2}{D_2} \cdot \sqrt{h_H + f \cdot \frac{L}{D_2} + \sum_{i=1}^n k_{si}} \right) \quad (3)$$

onde:

$Q$  — vazão de projeto a ser medida. Geralmente é definida por dois valores extremos:

$$Q_{\min} < Q < Q_{\max}$$

$q$  — vazão lida no hidrômetro. É a vazão que passa no conduto em paralelo com a singularidade introduzida no conduto principal.

$\alpha$  — coeficiente de vazão, dado pelo quadro 1.

Os coeficientes de vazão do quadro 1 são baseados em fórmulas empíricas apresentadas na Norma ISO — R 541 "Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plates and Nozzles", válidas para tomadas de pressão do tipo "Vena Contracta".

Na realidade, o quadro 1 é resultante de simplificações das citadas fórmulas, as quais levam em consideração a variação de  $\alpha$  em função do Número de Reynolds, do diâmetro, e de  $\beta$ .

$\beta = \frac{D_s}{D_1}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$m = \frac{D_s^2}{D_1^2}$	0,01	0,04	0,09	0,16	0,25	0,36	0,49	0,64
$\alpha$	0,592	0,593	0,596	0,603	0,619	0,648	0,696	0,782

QUADRO 1 – Valores de  $\alpha$  em Diafragmas

$\beta = \frac{D_s}{D_1}$	Espaçamento das tomadas a jusante ( $l$ )
0,10	0,84 $D_1 \pm 30\%$
0,15	0,82 $D_1 \pm 30\%$
0,20	0,80 $D_1 \pm 30\%$
0,25	0,78 $D_1 \pm 30\%$
0,30	0,76 $D_1 \pm 30\%$
0,35	0,73 $D_1 \pm 25\%$
0,40	0,70 $D_1 \pm 25\%$
0,45	0,67 $D_1 \pm 25\%$
0,50	0,63 $D_1 \pm 20\%$
0,55	0,59 $D_1 \pm 20\%$
0,60	0,55 $D_1 \pm 15\%$
0,65	0,50 $D_1 \pm 15\%$
0,70	0,45 $D_1 \pm 10\%$
0,75	0,40 $D_1 \pm 10\%$
0,80	0,34 $D_1 \pm 10\%$

QUADRO 2 – Espaçamento de jusante das tomadas tipo "Vena Contracta"

Entretanto, apenas  $\beta$  influi sensivelmente nos valores de  $\alpha$ , sendo que as influências de  $D_s$  e Reynolds são tão pequenas que podem ser desprezadas tendo em vista as aplicações desse trabalho.

Para que haja coerência no uso do quadro 1, torna-se necessário que se faça a montagem conforme Fig. 2, sendo que os valores de  $l$  deverão ser adotados conforme quadro 2.

$L$  – Comprimento real da canalização que contém o hidrômetro.

$k_{Si}$  – Coeficientes das perdas localizadas introduzidas pelas singularidades existentes na canalização que contém o hidrômetro. Podem ser obtidos pelo quadro 3.

\* A velocidade  $V$  se refere sempre à velocidade média na secção do conduto em Shunt, de diâmetro  $D_2$ .

\*\* No caso em que  $D_2$  é o menor diâmetro  $K = 0,30$ . No caso em que  $D_2$  é o maior diâmetro,

$$K = 0,30 \cdot \frac{D_2^4}{D_R^4}$$

sendo  $D_R$  o menor diâmetro.

\*\*\* No caso em que  $D_2$  é o menor diâmetro,  $K = 0,15$ . No caso em que  $D_2$  é o maior diâmetro,

$$K = 0,15 \cdot \frac{D_2^4}{D_R^4}$$

$D_s$  – diâmetro da menor seção transversal da singularidade

$D_2$  – diâmetro do conduto em paralelo à singularidade

$f$  – Coeficiente da fórmula universal. Definido diretamente no ábaco de Moody em função do Número de Reynolds ( $R = \frac{V D_2}{\nu}$ )

e da rugosidade média equivalente,  $\epsilon$ .

$k_H$  – Coeficiente da perda localizada introduzida pelo hidrômetro, dado pela expressão:

$$k_H = \frac{2g \lambda \pi^2 D_2^4}{16 Q^2} \quad \text{onde:}$$

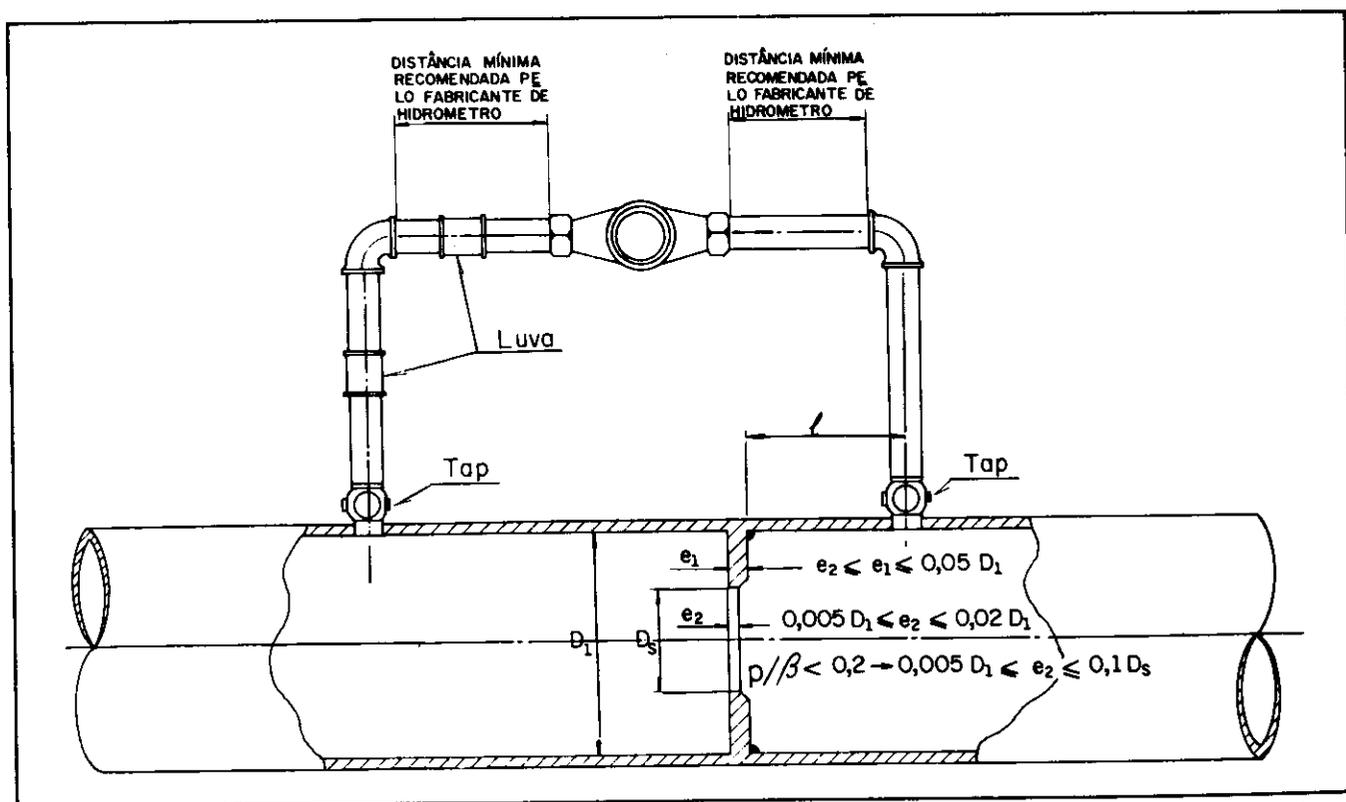


FIG. 2

QUADRO 3 - Valores de K da fórmula:  $\lambda = K \cdot \frac{V^2}{2g}^*$

Peça	K	Peça	K
Ampliação gradual	**	Junção	0,40
Bocais	2,75	Medidor Venturi	2,50
Comporta aberta	1,00	Redução gradual	***
Controlador de vazão	2,50	Registro de ângulo aberto	5,00
Cotovelo de 90°	0,90	Registro de gaveta aberto	0,20
Cotovelo de 45°	0,40	Registro de globo aberto	10,00
Crivo	0,75	Saída de canalização	1,00
Curva de 90°	0,45	Tê passagem direta	0,60
Curva de 45°	0,20	Tê saída de lado	1,30
Curva de 22 1/2°	0,10	Tê saída bilateral	1,80
Entrada normal em canalização	0,50	Válvula de pé	1,75
Entrada de borda	1,00	Válvula de retenção	2,50
Existência pequena derivação	0,03		

$\lambda$  - perda localizada introduzida pelo hidrômetro

Q - vazão correspondente à perda localizada (MKS)

No Quadro 4, são definidos ainda os seguintes parâmetros:

q min - vazão mínima de trabalho. Coincide com a vazão separadora ( $\pm 2\%$ ), para assegurar uma maior precisão do elemento secundário. Além disso, devido à ampla faixa de

trabalho dos hidrômetros torna-se desnecessário fazer com que o hidrômetro trabalhe a partir do limite inferior de exatidão.

q máx - Vazão máxima de trabalho: é a vazão limitada pela perda de carga máxima tolerável, provocável pelo hidrômetro ou pelo esforço mecânico suportável pelo equipamento. Nos hidrômetros Multijato e Woltmann Vertical

a perda de carga de 2,5 m limitou as vazões máximas de trabalho. Justifica-se a adoção desse critério, pelo diferencial de pressão máximo que poderia ser provocado pelo primário (2,5 m) e as correspondentes perdas de carga nas tubulações que a partir desse limite começam a ser significativas.

Nos hidrômetros Woltmann Horizontal, a vazão máxima de trabalho foi limitada pela vazão correspondente à perda de carga de 1 m, a qual é bastante próxima da máxima suportável pelo equipamento.

q méd - Vazão média de trabalho. É obtida pela relação:

$$q_{\text{méd.}} = q_{\text{mín.}} \sqrt{\frac{q_{\text{máx.}}}{q_{\text{mín.}}}}$$

No caso do diâmetro  $D_2$  ser diferente do diâmetro do hidrômetro ( $D_h$ ), a constante  $k_H$  deverá ser ajustada através de um fator de multiplicação definido pela expressão:

$$\text{são: } \frac{D_2^4}{D_h^4}. \text{ Portanto, o valor } k_H \text{ da tabela deve ser corri-}$$

TIPO	Vazão característica (m³/h)	Diâmetro do D 2 Hidrômetro		Vazão mínima de trabalho (l/h)	Vazão média de trabalho (l/h)	Vazão máxima de trabalho (l/h)	Vazão máxima recomendável instantânea (l/h)	$k_H$
		Pol.	mm					
Multijato	3	1/2 ou 3/4	12,7 ou 19,1	150	474	1.500	3.000	4,53 23,19
	5	3/4	19,1	250	791	2.500	5.000	8,35
	7	1	25,4	350	1.107	3.500	7.000	13,32
	10	1	25,4	500	1.581	5.000	10.000	6,53
	20	1 1/2	38,1	1.000	3.162	10.000	20.000	8,26
	30	2	50,8	1.500	4.743	15.000	30.000	11,61
Woltmann Vertical (WS)	30	2	50	3.000	9.165	28.000	30.000	3,13
	110	3	80	6.000	19.442	63.000	110.000	4,05
	180	4	100	9.000	29.240	95.000	180.000	4,34
	350	6	150	15.000	54.498	198.000	350.000	5,06
Woltmann Horizontal	350	6	150	30.000	97.980	320.000	350.000	0,78
	600	8	200	50.000	165.831	550.000	600.000	0,83
	1.000	10	250	80.000	252.982	800.000	1.000.000	0,96
	1.500	12	300	120.000	417.133	1.450.000	1.500.000	0,60
	2.800		400	150.000	670.820	3.000.000	2.800.000	0,45
	4.200		500	200.000	1.048.809	5.500.000	4.200.000	0,32

QUADRO 4 - Hidrômetros de Velocidade - Dados característicos.

gido, multiplicando-o por

$$\frac{D_2^4}{D_h^4} \text{ antes de aplicá-lo na fórmula 3.}$$

## 2.2. TUBO VENTURI

Caso o deprimogênio seja um tubo Venturi, é válida a mesma equação 3 e são válidas todas as considerações e parâmetros definidos no item 2.1, com excessão dos valores de  $\alpha$ , os quais são fornecidos pelo quadro 5.

O tubo Venturi aplicável ao caso é aquele dado pelo desenho da Figura 3.

## 2.3. REDUÇÃO GRADUAL

Aplicando Bernoulli entre as seções ① e ② vem:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + \lambda$$

Sendo  $\lambda$  a perda localizada, a qual é desprezível.

Considerando a expressão acima associada à equação (2) do item 2.1, e ainda admitindo que o coeficiente de contração da veia líquida é dado por:

$$C_c = \frac{D_c^2}{D_s^2}, \text{ teremos:}$$

$$\alpha = \left( 1 + \frac{\sqrt{h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{h_2}{\alpha^2}}}{\alpha^2 \sqrt{\frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g}}} \right) \quad (4)$$

O coeficiente de contração  $C_c$  é dado pelo Quadro 6.

No caso da redução ser brusca, os coeficiente de contração serão dados pelo Quadro 7.

Em ambos os casos (redução gradual ou brusca), os orifícios deverão ser praticados conforme os desenhos das Figuras 5 e 6.

São válidos para esse caso todos os parâmetros e definições do item 2.1.

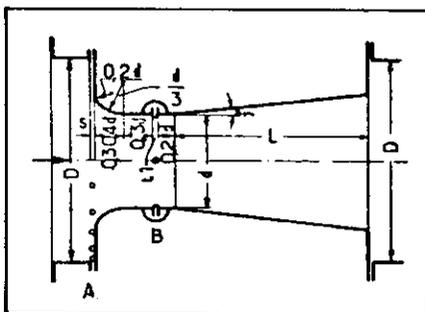


FIGURA 3 - TUBO VENTURI

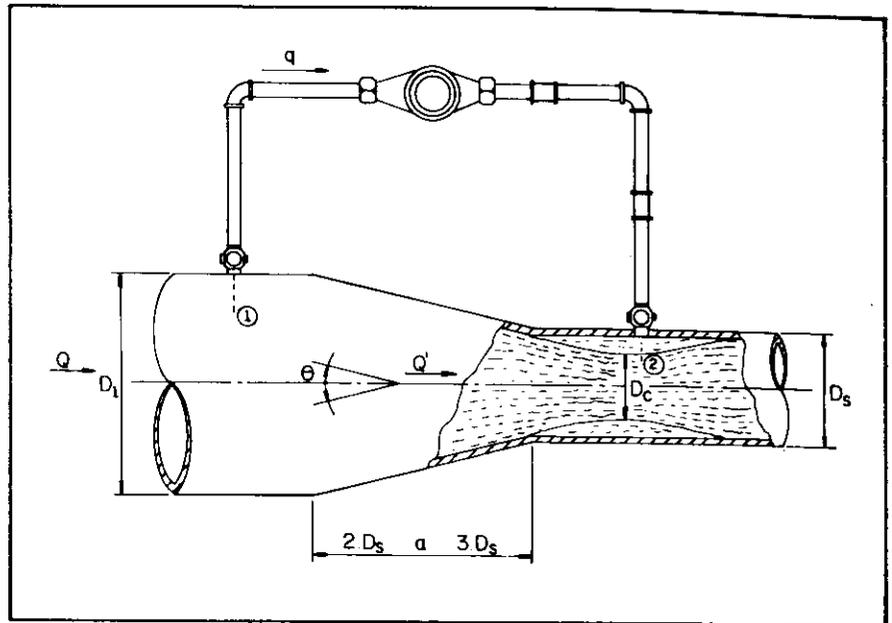


FIG. 4

Singularidade	$m = \frac{D_s^2}{D_1^2}$								
	0,05	0,10	0,20	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60
Tubo Venturi	0,986	0,989	1,001	1,020	1,032	1,048	1,067	1,092	1,155

QUADRO 5 - Coeficientes  $\alpha$  do Venturi.

Ângulo $\theta$	5°45'	11°15'	22°30'	45°
Coef. Contração (Cc)	0,96	0,94	0,87	0,80

QUADRO 6 - Coeficientes  $C_c$  de redução gradual

$\frac{D_s^2}{D_1^2}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$C_c$	0,625	0,630	0,625	0,660	0,680	0,714	0,750	0,810	0,895

QUADRO 7 - Coeficientes  $C_c$  da redução brusca

## 2.4. AMPLIAÇÃO GRADUAL

(Fig. 7)

Na ampliação gradual será considerado coeficiente de contração igual a 1 e será levada em consideração a perda de carga provocada pelo alargamento de seção.

Considerando as equações aplicáveis ao caso, teremos:

- Teorema de Bernoulli entre as seções ① e ②

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + \lambda$$

- Equação de continuidade:

$$v_1 \cdot s_1 = v_2 \cdot s_2$$

$$\text{sendo: } s_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \quad \text{e} \quad s_2 = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4}$$

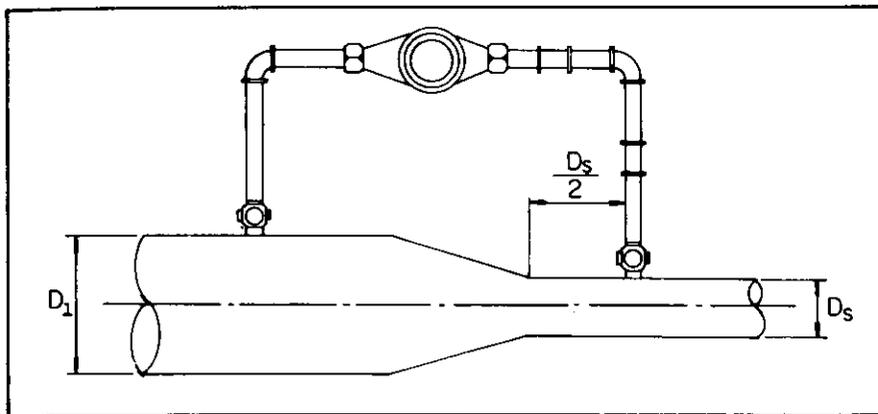


FIG. 5

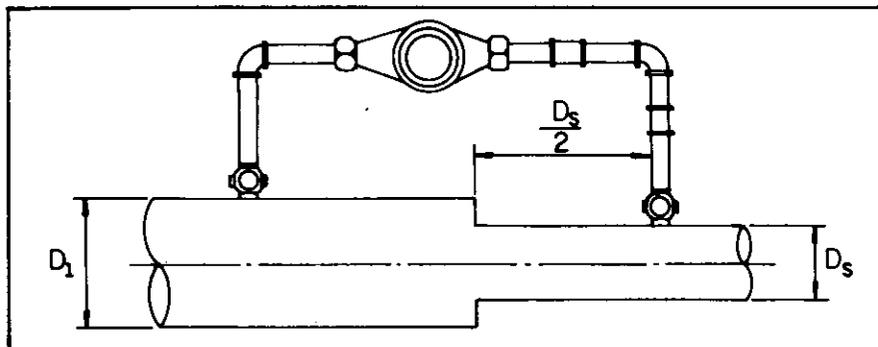


FIG. 6

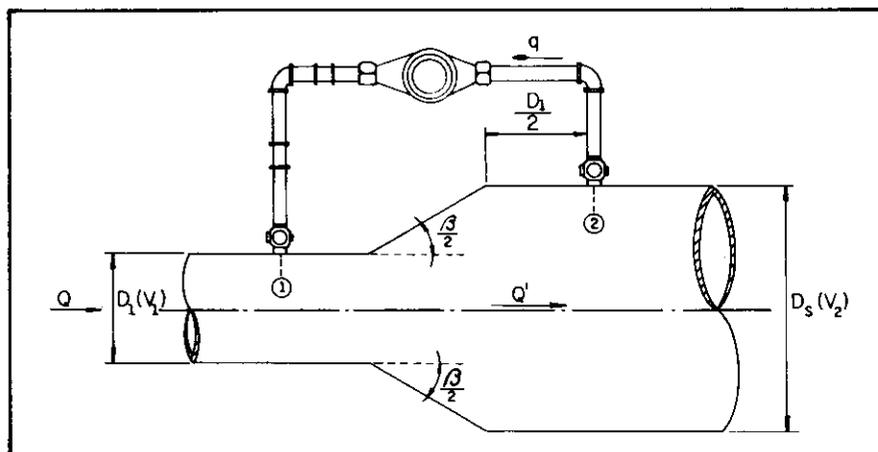


FIG. 7

$\beta$	5°	10°	20°	40°	60°	70°	80°	120°
K	0,13	0,17	0,42	0,90	1,10	1,20	1,08	1,05

QUADRO 8 - Coeficiente K do alargamento gradual

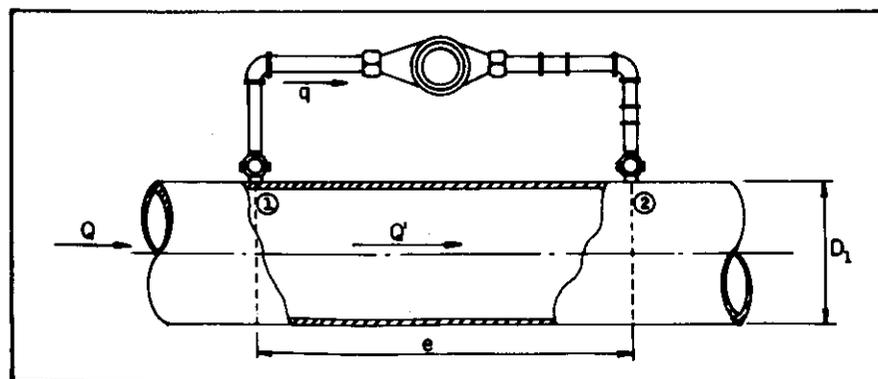


FIG. 8

- Balanço de vazões:

$$Q' = Q + q$$

- Equação (2) do item 2.1

$$q = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4 \sqrt{h_m + f \cdot \frac{L}{D_2} + \frac{K}{11} h_m}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta P}$$

- Equação da perda de carga localizada provocada pelo alargamento:

$$\lambda = \frac{K (V_1 - V_2)^2}{2 \cdot g}$$

A resolução do sistema de equações acima, fornece:

$$Q = q \left( \frac{\sqrt{h_m + f \cdot \frac{L}{D_2} + \frac{K}{11} h_m}}{D_2^2 \sqrt{\frac{1}{D_1^4} - \frac{1}{D_2^4} - \left( \frac{K}{D_1^4} - \frac{2K}{D_1^4 D_2^4} - \frac{K}{D_1^4} \right)}} - 1 \right) \quad (5)$$

O coeficiente K do alargamento é dado pelo Quadro 8.

## 2.5. TRECHO RETO DE TUBO

No caso da ocorrência de velocidades elevadas em um conduto reto, pode ser possível instalar-se um "Shunt", sem nenhuma singularidade que provoque pressão diferencial.

A perda de carga entre as seções ① e ② da fig. 8, provocada no escoamento através do conduto principal, é dada pela fórmula universal:

$$h_f = f \cdot \frac{e}{D} \cdot \frac{Q'^2 \cdot 16}{2 \cdot g \cdot \pi^2 \cdot D_1^4}$$

sendo que  $h_f$  é igual a  $\Delta P$  da equação (2), item 2.1:

$$q = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4 \sqrt{h_m + f \cdot \frac{L}{D_2} + \frac{K}{11} h_m}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta P}$$

Portanto, como  $h_f = \Delta P$  e

$Q = Q' + q$ , vem:

$$Q = q \left( 1 + \frac{\sqrt{h_m + f \cdot \frac{L}{D_2} + \frac{K}{11} h_m}}{\sqrt{f \cdot \frac{L}{D_1}}} \cdot \frac{D_2^2}{D_1^2} \right) \quad (6)$$

## 2.6. CURVA DE 90° (FIG. 9)

As curvas, notadamente as de 90°, podem servir como aparelhos primários (substituindo diafragmas ou outras singularidades). Como se sabe, em uma curva aparecem diferenciais de pressão  $\Delta P$  entre a parte interior e a exterior (na bissetriz do ângulo), os quais são proporcionais à vazão, segundo a expressão:

$$Q = \mu \cdot K \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta P} \quad \text{onde}$$

$\mu$  - coeficiente de vazão dado pelo quadro 6.

K — coeficiente de forma, função do raio R da curva e do diâmetro D do conduto (quadro 9)

S — área da seção transversal do conduto

Da mesma forma que visto anteriormente, no conduto que contém o hidrômetro, temos:

$$q = \frac{\pi D_s^2}{4 \sqrt{k_s + f \frac{L}{D_s} + \frac{K}{m^2}}} \sqrt{2g \Delta P} \quad (\text{eq. 2 do item 2.1})$$

Adotando os mesmos procedimentos vistos anteriormente, pode-se dimensionar o hidrômetro adequado.

Dividindo membro a membro as expressões acima, teremos:

$$Q = q \left( \frac{\mu K D^2 \sqrt{k_s + f \frac{L}{D_s} + \frac{K}{m^2}}}{D_s} \right) \quad (17)$$

### 2.7. SINGULARIDADE QUALQUER

Caso seja conhecida a função

$$Q' = K_s \sqrt{\Delta P}$$

, representativa de uma singularidade qualquer, (Fig. 10) determinada por exemplo com recursos de Pitometria, o cálculo teórico da relação  $Q = A_T \cdot q$  deve ser muito mais preciso.

Nesse caso, levando a função acima na equação 2 do item 2.1.:

$$q = \frac{\pi D_s^2}{4 \sqrt{k_s + f \frac{L}{D_s} + \frac{K}{m^2}}} \sqrt{2g \Delta P}$$

e considerando que  $Q = Q' + q$ , teremos:

$$Q = q \left( 1 + \frac{4 K_s \sqrt{k_s + f \frac{L}{D_s} + \frac{K}{m^2}}}{\pi D_s^2 \sqrt{2g}} \right) \quad (18)$$

sendo  $K_s$  determinado por ensaios de calibração ao campo, por meio de Pitometria.

Em princípio, qualquer singularidade existente na tubulação pode servir como primário para utilização do "shunt". Basta que sejam conhecidos parâmetros que caracterizem a lei de escoamento,  $Q = K \sqrt{\Delta P}$  a qual pode até mesmo ser levantada a partir de ensaios de campo. Citaríamos como primários passíveis de utilização, encontráveis facilmente no sistema instalado, as curvas, estreitamentos, ampliações, válvulas, etc.

## 3. DIMENSIONAMENTO

### 3.1. EXISTEM DOIS TIPOS BÁSICOS DE PROBLEMAS DE DIMENSIONAMENTO, CONFORME ABAIXO:

a) O primário deprimogêneo já está implantado no sistema de abastecimento de água. Em outras palavras, existe uma redução gradual, ampliação gradual, etc., que se deseja aproveitar como primário deprimogêneo.

b) O primário deprimogêneo, não está implantado no sistema de abastecimento de água. Nesse caso, o primário será dimensionado especialmente com o propósito de compor o "Shunt".

### 3.2. PRIMÁRIO JÁ IMPLANTADO

3.2.1 Determinar o valor de m, no caso de diafragmas e venturis:

$$m = \left( \frac{D_s}{D_1} \right)^2$$

Com o valor de m, procura-se  $\propto$  Nos Quadros 1 ou 5, respectivamente.

3.2.2 Determinar coeficientes de contração Cc nos casos de redução gradual ou brusca, pelos Quadros 6 ou 7, respectivamente.

3.2.3 Determinar o coeficiente K nos casos de alargamento gradual, em função do ângulo  $\beta$  de abertura, conforme Quadro 8.

$\frac{R}{D}$	1,0	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
$\mu$	1,23	1,10	1,07	1,05	1,04	1,03	1,03	1,02	1,02
K	0,570	0,697	0,794	0,880	0,954	1,02	1,08	1,14	1,20

QUADRO 9 Valores de  $\mu$  e K

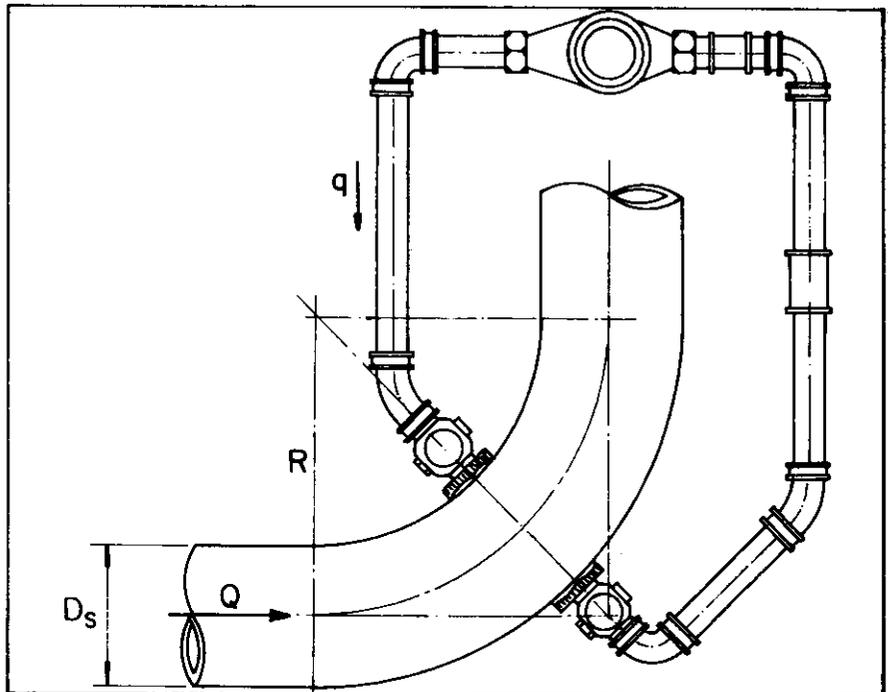


FIG. 9

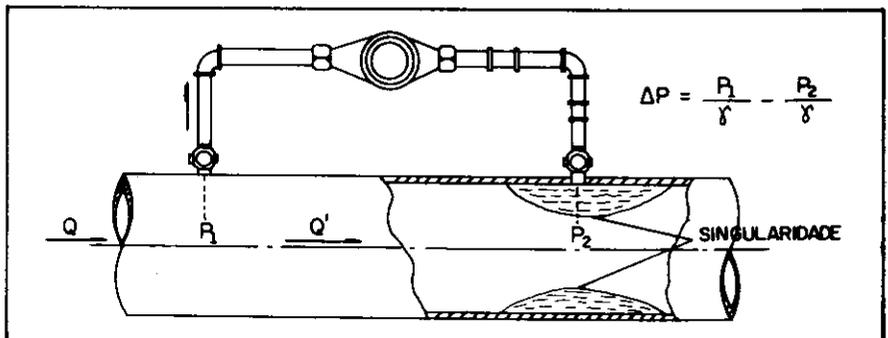


FIG. 10

3.2.4 Determinar  $\mu$  e  $K$  nos casos de curva de  $90^\circ$ , em função da relação  $\frac{R}{D}$ , conforme Quadro 9.

3.2.5 Determinar  $K_s$  nos casos de uma singularidade qualquer, por meio de ensaios de Pitometria, caso desejado um pré-dimensionamento mais preciso.

3.2.6 Adotar, inicialmente,  $D_2 = 3/4''$  com hidrômetro Multijato de  $3 \text{ m}^3/\text{h}$ .

No Quadro 4 determina-se  $k_H$ . Esse último valor deve ser corrigido no caso do diâmetro do hidrômetro ser diferente do diâmetro  $D_2$ . A correção será feita, multiplicando o valor  $k_H$  da tabela, por  $\frac{D_2^4}{D_H^4}$ , sendo  $D_H$  o diâmetro do hidrômetro.

3.2.7 Admitir escoamento turbulento hidraulicamente rugoso. Conhecido o material do tubo em paralelo, no Quadro 10, determina-se  $\epsilon$

Calcula-se  $\frac{D_2}{\epsilon}$ , admite-se que o escoamento é turbulento hidraulicamente rugoso e no diagrama de Moody, determina-se  $f$ .

3.2.8 A partir de um esquema de pré-dimensionamento (Lay-out) e com o Quadro 3, determinam-se os valores  $k_{S_i}$

3.2.9 Conhecidas as vazões média, máxima e mínima de escoamento na seção transversal ( $Q_{\text{méd}}$ ,  $Q_{\text{máx}}$  e  $Q_{\text{min}}$ ), as quais são definidas por medições pitométricas, ou na falta desse recurso, por estimativa, substitui-se  $Q_{\text{máx}}$  por  $Q$ , em uma das fórmulas de (3) a (8), conforme o caso, e calcula-se o valor correspondente de  $q$ , o qual será chamado  $q_{\text{máx}}$ . O valor  $q_{\text{máx}}$  não poderá ser superior à vazão máxima de trabalho definida no Quadro 4.

Caso seja superada a vazão máxima do Quadro 4, pesquisar outros diâmetros  $D_2$  e ou outras capacidades de hidrômetros.

Com o valor  $Q_{\text{min}}$ , entra-se em uma das fórmulas de (3) a (8) conforme o tipo de singularidade e determina-se o correspondente valor de  $q$  o qual será chamado  $q_{\text{min}}$ . O valor  $q_{\text{min}}$  não poderá ser inferior à vazão mínima de trabalho definida no Quadro 4.

Caso a vazão  $q_{\text{min}}$  calculada seja inferior à da tabela, pesquisar outros diâmetros  $D_2$  e ou outras capacidades de hidrômetros para que o problema seja eliminado.

Existem situações em que a vazão  $Q_{\text{min}}$  é nula.

Nesse caso admitir que exista um valor  $Q_{\text{min}}$  dado pela seguinte expressão:  $Q_{\text{min}} = 0,5 Q_{\text{méd}}$  e proceder exatamente como indicado acima, ou seja, verificar se para o valor  $Q$

min, o seu correspondente  $q_{\text{min}}$  calculado por uma das equações de (3) a (8) é inferior à vazão mínima de trabalho definida no Quadro 4. Caso isso não ocorra o problema está resolvido. Caso  $q_{\text{min}}$  seja inferior ao valor do Quadro 4, pesquisar outros diâmetros  $D_2$  e ou hidrômetros para que se tenha  $q_{\text{min}}$  maior do que a vazão mínima de trabalho do Quadro 4. Tanto quanto possível, as vazões  $q_{\text{méd}}$  devem ser aproximar das vazões médias de trabalhos do Quadro 4.

3.2.10 Com o valor  $D_2$  calculado determina-se o Número de Reynolds pela expressão:

$$R = \frac{V_{\text{med}} \cdot D_2}{\nu} \quad , \text{onde}$$

$R$  – Número de Reynolds

$V_{\text{med}}$  – Velocidade média na seção transversal do conduto de diâmetro  $D_2$ , determinada da seguinte forma:

$$V_{\text{med}} = \frac{q_{\text{med}} \cdot 4}{\pi \cdot D_2^2} \quad (\text{m/s})$$

$D_2$  – Diâmetro do "shunt" (m)

$\nu$  – Coeficiente cinemático de viscosidade ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

Com o valor de  $R$  e  $\frac{\epsilon}{D_2}$ , verifica-se no Diagrama de Moody (Fig. 11) se o escoamento é realmente turbulento hidraulicamente rugoso. Caso afirmativo ficam validados os cálculos de dimensionamento de  $D_2$ . Caso o escoamento seja turbulento hidraulicamente liso ou de transição entre o hidraulicamente liso e hidraulicamente rugoso, determinar ao Diagrama de Moody, com os valores  $R$  e  $\frac{\epsilon}{D_2}$ , o valor corresponde de  $f$ , que será naturalmente, diferente daquele determinado admitindo-se escoamento turbulento hidraulicamente rugoso (itens 3.2.7).

MATERIAL	CONDIÇÃO	K em mm
Latão, cobre, alumínio plástico e vidro	lisa, sem deposição de sedimentos	< 0,03
Aço	novo, sem costura estirado a frio	< 0,03
	novo, sem costura estirado a quente	0,05 a 0,10
	novo, sem costura rolado	0,05 a 0,10
	novo, soldado longitudinalmente	0,05 a 0,10
	novo, soldado helicoidalmente	0,10
	levemente enferrujado	0,10 a 0,20
	enferrujado	0,20 a 0,30
	encrustado	0,50 a 2
	com muitas encrustações	> 2
	novo, revestido com betume	0,03 a 0,05
	em uso, revestido com betume	0,10 a 0,20
	galvanizado	0,13
Ferro fundido	novo	0,25
	enferrujado	1,0 a 1,5
	encrustado	> 1,5
	novo, revestido com betume	0,10 a 0,15
cimento amianto	novo, com isolamento ou não	< 0,03
	em uso, sem isolamento	0,05

QUADRO 10 – Valores de  $\epsilon$  da Fórmula Universal

Temperatura (°C)	Viscosidade cinemática ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
0	$1,79 \times 10^{-6}$
4	$1,57 \times 10^{-6}$
10	$1,31 \times 10^{-6}$
20	$1,01 \times 10^{-6}$
30	$0,83 \times 10^{-6}$
40	$0,66 \times 10^{-6}$

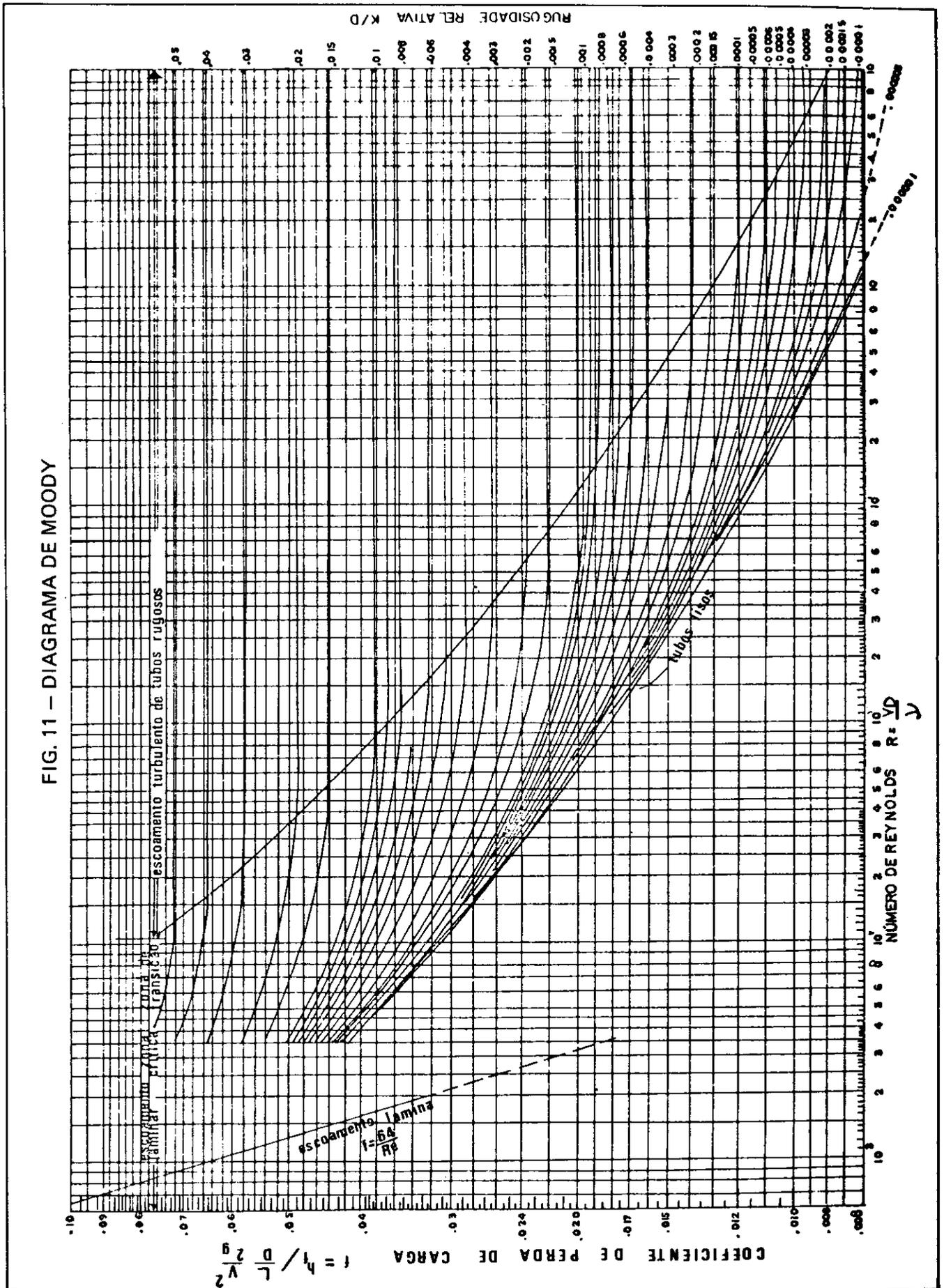
QUADRO 11 – Coeficiente cinemático de viscosidade

Com esse novo valor de  $f$ , refazer todos os cálculos a partir do item 3.2.7 e repeti-los até que haja convergência do valor de  $f$ .

### 3.3. PRIMÁRIO A SER DIMENSIONADO

Evidentemente essa condição é mui-

to mais cômoda já que poderá ser dimensionado o primário adequado para o hidrômetro disponível. (Geralmente de  $3 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Serão excluídos des-



sa análise os primários definidos nos itens 2.6 e 2.7, os quais devem ser analisados independentemente.

3.3.1 Adotar hidrômetro de capacidade de  $3 \text{ m}^3/\text{h}$  e diâmetro  $D_2 = \frac{3''}{4}$

3.3.2 Pelos mesmos processos adotados nos itens (a), calcular

$$h_H, f, \sum_{i=1}^n h_{Si}$$

3.3.3 Normalmente é conhecido  $D_1$ . Adotar um valor  $\infty$  ou  $C_c$  médios conforme o deprimogêneo em estudo. De posse desses valores e dos demais parâmetros conhecidos, determina-se  $D_s$  pelo emprego das fórmulas de (3) a (6) conforme o caso. Para isso, adotar a vazão  $Q$  igual a  $Q$  méd e  $q$  igual à vazão média de trabalho definida pelo Quadro 4 para o hidrômetro respectivo.

Determinado  $D_s$ , calcula-se um novo valor de  $\infty$  ou  $C_c$ , conforme o caso, entra-se em uma das fórmulas de (3) a (6), novamente e determina-se um novo  $D_s$ . Repete-se o procedimento até que haja convergência no valor  $D_s$ .

3.3.4 Verifica-se, da mesma forma que no item (a), se o hidrômetro irá trabalhar entre as vazões mínima e máxima de trabalho preconizadas pelo Quadro 4.

#### 4. CRITÉRIOS CONSTRUTIVOS

4.1 É recomendável que todo o material utilizado na construção do "Shunt" seja não ferroso para evitar processos acelerados de tuberculização ou corrosão. Particularmente, recomenda-se que nos furos praticados no deprimogêneo sejam sempre instalados registros de derivação de 1" do tipo macho (utilizado em Pitometria), em material não ferroso. O encanamento do Shunt pode ser em PVC ou galvanizado revestido com tinta protetora (epoxi).

4.2 O diâmetro  $D_2$  deve ser sempre igual ou superior a  $3/4''$  para evitar obstruções causadas por pequenas partículas.

4.3 Nunca devem ser adotadas as tomadas de pressão de aparelho deprimogêneos existentes como saída para o Shunt, já que as

mesmas apresentam diâmetros muito pequenos podendo ser facilmente obstruídas.

4.4 Todas as recomendações dos fabricantes de hidrômetros devem ser rigorosamente seguidas na montagem do Shunt.

4.5 Os hidrômetros empregados nos Shunts devem ser previamente testados em bancada. Os mesmos deverão satisfazer pelo menos a duas condições:

a) Terem o mesmo valor  $h_H$  definido no Quadro 2, o qual é preconizado pelo próprio fabricante.

b) Apresentar boa precisão ( $\pm 2\%$ ) a partir do limite inferior de tolerância.

4.6 O primário deprimogêneo deve ser montado em um trecho reto de tubulação de extensão tal que o escoamento junto ao primário, não seja perturbado por singularidades adjacentes.

Uma boa técnica é montar o primário a uma distância igual ou superior a  $20 D_1$  a jusante de singularidades e a uma distância igual ou superior a  $10 D_1$  a montante de singularidades.

Entretanto, para cada tipo de primário existem recomendações específicas mais precisas a respeito das distâncias mínimas de tubos retos a observar.

#### 5. ENSAIOS DE CAMPO

Uma vez definida teoricamente a relação  $Q = A_T \cdot q$ , sendo  $A_T$  uma constante válida para cada tipo de instalação, torna-se necessário levantar em campo, após construída a

instalação, o valor real do fator de multiplicação de  $q \cdot (A_R)$ . Naturalmente, definido  $A_R$ , em um intervalo de tempo  $\Delta t$ , os volumes escoados total (primário + Shunt),  $V$ , e parcial (Shunt),  $v$ , se relacionam pela mesma expressão:  $V = A_R v$ .

A determinação de  $A_R$  se faz tranquilamente, utilizando-se um tubo Pitot, instalado em série com o medidor tipo Shunt. (Fig. 12). Medem-se vários pares ( $Q, q$ ), varrendo uma faixa de vazão de 0 até a máxima vazão usual,  $Q_{\text{max}}$  (10 pares são normalmente suficientes). Com esses dados, pode-se calcular o valor de  $A_R$ , utilizando-se análise de regressão linear:

$$A_R = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot q_i}{\sum_{i=1}^n q_i^2} \quad \text{sendo } n \text{ o número de pares } (Q_i, q_i)$$

Evidentemente não iremos detalhar os procedimentos para medição de vazão com tubo Pitot ou hidrômetro, já que isso estaria fora do escopo desse trabalho.

#### 6. PRECISÃO

Todos os procedimentos descritos no item (3) levam a um dimensionamento do sistema, com precisão suficiente para se estimar vazões. A equação teórica  $Q = A_T \cdot q$ , se aplicada quando do funcionamento definitivo do Shunt pode gerar erros maiores ou menores dependendo do rigor utilizado na construção do Shunt. A aplicação da fórmula teórica somente se justifica nos casos em que há necessidade de se estimar vazões, com boa repetibilidade, quando a precisão esperada não é exagerada.

Nos casos em que o sistema é calibrado com auxílio de tubo Pitot, a precisão pode se aproximar daquela obtida com o uso de aparelhos secundários convencionais

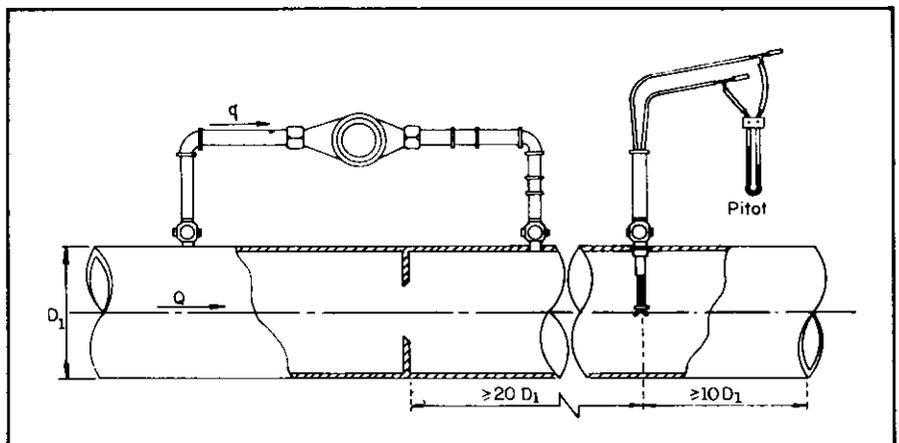


FIG. 12

(± 2%). Entretanto, é importante que a calibração se faça periodicamente, tendo em vista não apenas detecção de problemas de funcionamento do hidrômetro, como também, para acompanhar as variações do ( $A_R$ ) devido a alterações na rugosidade do Shunt e primário.

As fórmulas teóricas definidas nos itens anteriores não levaram em consideração o efeito da turbulência e alterações do escoamento nos condutos deprimogêneos, motivadas pelo escoamento no Shunt.

Entretanto, em face do grande valor de  $Q$  em confronto com  $q$ , os desvios não devem ser comprometidos.

O desenvolvimento de protótipos de deprimogêneos e canalizações de Shunts em bancadas, pode levar também a equipamentos com excelente precisão, fabricados em série.

## 7. ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DE PROTÓTIPO

### 7.1. INTRODUÇÃO

As pesquisas de calibração de protótipos de medidores proporcionais em bancadas podem levar à viabilização de construção desses equipamentos em série, o que tornará prescindível a calibração dos mesmos por processos pitométricos, após a instalação definitiva no campo.

Na construção de equipamentos em série é necessário que sejam reproduzidas todas as características do protótipo, sob pena de não se conseguir a repetibilidade esperada no campo.

Particularmente, é importante que os dados característicos básicos do hidrômetro utilizado ( $k_H$ , vazão características) nos ensaios do protótipo sejam mantidos quando da escolha dos hidrômetros a utilizar na fabricação seriada ou quando da substituição de hidrômetros no campo para manutenção.

Nos casos em que não seja possível conseguir um hidrômetro com a mesma constante  $k_H$  do hidrômetro do protótipo, a qual originou a relação  $Q = A_R \cdot q$ , então pode-se selecionar um outro hidrômetro de constante  $k_{HS}$ , tão próxima quanto possível de  $k_H$ , introduzindo porém um fator de correção igual a, aproximadamente,  $\sqrt{\frac{k_{HS}}{k_H}}$ . A relação de correspondência de vazão fica então:

$$Q = A_R \cdot q \cdot \sqrt{\frac{k_{HS}}{k_H}} \quad \text{onde}$$

$Q$  — vazão total

$A_R$  — constante obtida na calibração do protótipo ou em calibrações de campo com tubo Pitot

$q$  — Vazão lida no hidrômetro

$k_{HS}$  — Constante do hidrômetro que substitui o de características idênticas ao protótipo.

$k_H$  — constante do hidrômetro do protótipo

### 7.2. ENSAIOS REALIZADOS EM UM PROTÓTIPO

Foi ensaiado em bancada de testes hidráulicos existente na oficina de manutenção de hidrômetros da SABESP, um protótipo de medidor proporcional.

Os dados do ensaio são:

- Diâmetro da tubulação:  $D_1 = 100$  mm
- Placa de orifício:  $D_s = 79$  mm
- Hidrômetro: Multijato da Tecnóbrás, de  $3 \text{ m}^3/\text{h}$ , 3/4", sem o filtro (devido à existência de impurezas na água).
- Bancada de aferição de hidrômetro Woltmann, modelo H. Meinecke-A.6, fabricada em 1962, procedência alemã. A máquina foi adaptada para o ensaio, para atender a requisitos de trecho reto de tubulação a montante (20 D) e jusante (5 d) do primário.
- Comprimento da canalização secundária:  $L = 0,75$  m
- Diâmetro da canalização secundária:  $D_2 = 3/4''$
- Canalização secundária de aço galvanizado sem revestimento.

#### 7.2.1. Determinação do $A_T$

Temos:

$$Q = q \left( 1 + \frac{\alpha D_2^2}{D_1^2} \sqrt{h_m + f \frac{L}{D_2} + \frac{\sum k_{si}}{10} h_m} \right)$$

Portanto:

$$A_T = 1 + \frac{\alpha D_2^2}{D_1^2} \sqrt{h_m + f \frac{L}{D_2} + \frac{\sum k_{si}}{10} h_m}$$

onde:

- $m = \frac{D_2^2}{D_1^2} = \frac{79^2}{100^2} = 0,62 \rightarrow$  Quadro 1  $\rightarrow \alpha \cong 0,780$
- $D_s = 0,079$  m
- $D_2 = 0,019$  m
- Quadro 2  $\rightarrow$  Hidrômetro 3/4" e  $3 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow k_H = 23,19$

• Quadro 3  $\rightarrow$  Aço Galvanizado  $\rightarrow$

$$\rightarrow \epsilon = 0,00017 \text{ m} \rightarrow \frac{\epsilon}{D_2} = 0,0089 \rightarrow$$

$\rightarrow$  Diagrama de MOODY  $\rightarrow$

$$\rightarrow f = 0,036$$

•  $L = 0,75$  m

$$\bullet \sum_{i=1}^n k_{Si} :$$

1 entrada normal:  $K_S = 0,50$

1 saída de canalização:  $K_S = 1,00$

2 curvas de 90° :  $K_S = 0,90$

$$\sum_{i=1}^n k_{Si} = 2,40$$

Portanto:

$$A_T = 1 + \frac{0,780 \cdot 0,079^2}{0,019^2} \cdot \sqrt{23,19 + \frac{0,036 \cdot 0,75}{0,019} + 2,40}$$

$$A_T \cong 71,1$$

#### 7.2.2 Determinação do $A_R$

Os ensaios realizados em bancada, forneceram os dados mostrados no Quadro 12.

O coeficiente  $A_R$  foi obtido por regressão linear, conforme já visto anteriormente, tendo sido obtido o valor  $A_R = 70,27$ , que difere do valor calculado teoricamente ( $A_T = 71,1$ ), de 1,2%.

Os desvios observados na última coluna do Quadro 12 são devidos em parte, a falhas da própria bancada de teste, a qual não atende a todos os requisitos da técnica usual de calibração de protótipos.

Mesmo assim a repetibilidade, definida pelos valores  $ARI$ , se mostra excelente.

O erro padrão para um nível de confiança de 95% é da ordem de  $1 \text{ 293 l/h}$ , conforme figura 13.

## 8. CONCLUSÃO

Existem hoje vários medidores proporcionais em funcionamento no Sistema de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de São Paulo.

Tais medidores têm sido instalados com o aproveitamento de singularidades que provocam pressões diferenciais suficientes para provocar escoamento nas canalizações secundárias providas de hidrômetros.

Após a instalação de tais medidores, têm sido realizados ensaios de calibração no campo com recursos de pitometria.

Os medidores proporcionais, instalados da forma descrita acima, com a

tubulação em carga (a colocação dos TAPs é feita com máquina Mueller), têm se revelado precisos e confiáveis e representam um instrumento de

apoio considerável à operação pela sua simplicidade, rapidez de instalação e baixo custo.

Naturalmente, muitos ensaios de

laboratório e de campo ainda deverão ser feitos, para se determinar com maior precisão seu alcance e suas limitações.

Ensaio	Tempo (seg.)	Dados obtidos no hidrômetro		Dados obtidos no reservatório aferido		Coefic. $\frac{Q_i}{q_i}$ Ari =	Coefic. AR (Reg. linear)	Desvio (%) Ari/AR
		Volume (l)	Vazão (qi) (l/h)	Volume (l)	Vazão (Qi) (l/h)			
1	572	48,0	302	3.500	22.028	72,92	70,27	+3,77
2	570	48,5	306	3.500	22.105	72,16	70,27	+2,70
3	570	48,5	306	3.500	22.105	72,16	70,27	+2,70
4	454	48,0	381	3.500	27.753	72,92	70,27	+3,77
5	455	48,0	380	3.500	27.692	72,92	70,27	+3,77
6	455	48,0	380	3.500	27.692	72,92	70,27	+3,77
7	366	50,0	492	3.500	34.426	70,00	70,27	-0,38
8	366	50,0	492	3.500	34.426	70,00	70,27	-0,38
9	368	50,5	494	3.500	34.239	69,31	70,27	-1,37
10	322	50,0	559	3.500	39.130	70,00	70,27	-0,38
11	324	50,5	561	3.500	38.889	69,31	70,27	-1,37
12	324	50,5	561	3.500	38.889	69,31	70,27	-1,37
13	324	50,5	561	3.500	38.889	69,31	70,27	-1,37
14	275	50,5	661	3.500	45.818	69,31	70,27	-1,37
15	274	50,5	663	3.500	45.985	69,31	70,27	-1,37
16	286	49,0	617	3.500	44.056	71,43	70,27	+1,65

QUADRO 12 - Resultados obtidos no ensaio de protótipo de medidor proporcional

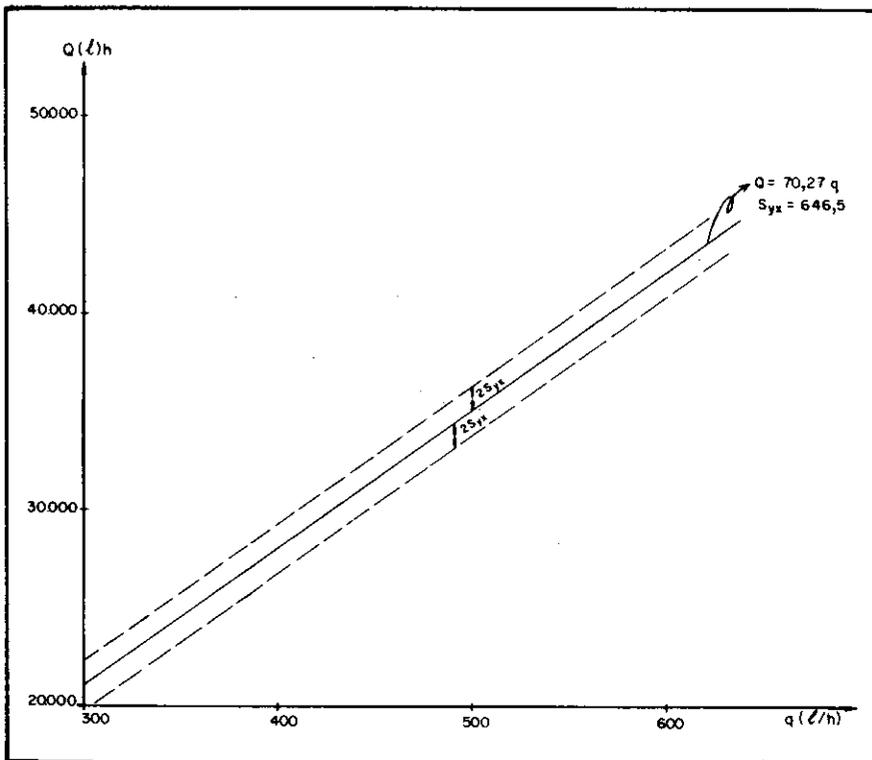


GRÁFICO I - Representação da relação  $Q = q A_R$

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Garcez, L.N. "Elementos de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral" - Editora Edgard Blucher, São Paulo, 1960.
- Lancaster, A. "Manual de Hidráulica Geral" Editora Edgard Blucher, São Paulo, 1972
- Azevedo Neto, J.M. "Manual de Hidráulica" Editora Edgard Blucher, São Paulo, 1973.
- Streeter, Victor L. "Mecânica dos Fluidos", Editora Mc Graw-Hill do Brasil, Ltda. São Paulo, 1974.
- Coelho, A.C.C. e Pinho J.H. "Macro-medição - Medidor de Derivação - Uma Solução Prática para os Sistemas de Médio e Pequeno Porte" - Revista DAE nº 122/1979 - São Paulo
- Spink, L.K. "Principles and Practice of Flow Meter Engineering" The Foxboro Company, Massachusetts, U.S.A., 1967.
- ISO - R 541 - "Measurement of fluid flow by means of orifice plates and nozzles - 1 ed - jan. 1967.
- ISO - R 781 - "Measurement of fluid flow by means of venturi tubes" 1 ed.