

# O TUBO DE «PITOT» E SUA UTILIZAÇÃO

Eng.º SIVAR HOEPPNER FERREIRA (\*)

## 1. HISTÓRICO:

Assim como diversas outras invenções da mesma época, somente muito tempo depois é que teve seu emprego a máquina para medir velocidades das águas correntes e barcos, nome dado pelo seu inventor Henri Pitot (1695-1771), cuja descrição apareceu em 1732 nas «Memoires de l'Academie Royale de Sciences». Foi preciso esperar cento e vinte anos para que fosse efetivamente aplicada no campo da hidrometria. As alterações e aperfeiçoamentos introduzidos por Darcy em 1858, tornaram o uso do instrumento mais prático. Dêle fez amplo emprego Bazin em seus estudos, porém somente em condutos livres. As modificações de maior importância foram porém realizadas por Edward S. Cole, em fins do último século (1896). Tais modificações fizeram o uso do pitômetro em canalizações sob pressão extremamente prático. A facilidade com que pode ser colocado em qualquer ponto de um sistema de distribuição de água, medindo-se assim a vazão nesse local, sem que seja necessário interromper o funcionamento do mesmo, tornou possível a determinação exata de uma série de elementos que possibilitam uma análise das condições reais de funcionamento do mesmo, bem como a obtenção de dados de projeto exatos. Estes dados, juntamente

com os de crescimento de populações e de demanda futuras, são básicos para operação racional do sistema, projetos de melhorias e ampliações, determinação de necessidades prováveis com respeito a fontes de suprimento, tubulações de adução, reservatórios e rede de distribuição, etc.

A finalidade deste trabalho é a descrição de um método de medição de vazões com o tubo Pitot, seus fundamentos teóricos, e de algumas utilizações práticas no campo de análise de sistemas de distribuição de água.

## 2. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO

O tubo de Pitot é um medidor de velocidade, de pressão de impacto, constituído fundamentalmente por duas tomadas de pressão (fig. 1), com o eixo paralelo ao escoamento, sendo uma com a abertura voltada para montante e outra no sentido contrário. Esta última pode também ter o eixo perpendicular ao escoamento.

Seja:

$p_t$  = pressão total no orifício de entrada

$p_s$  = pressão estática no orifício de entrada

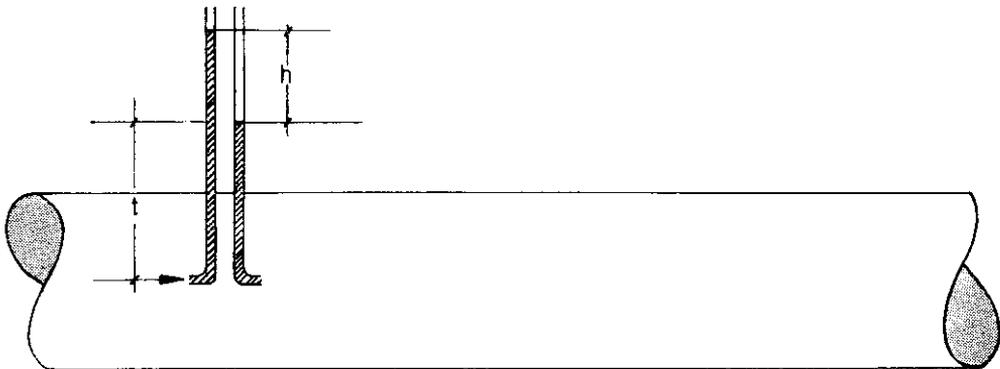


Fig. 1

(\*) Engenheiro da SPP-SAEC.

$h$  = diferença entre as alturas de carga dinâmica e estática  
 $v$  = velocidade no ponto onde se acha o orifício de entrada

$\gamma_1$  = peso específico da água  
 $\gamma_2$  = peso específico do líquido indicador  
 $N - N$  = nível de referência.

Assim (fig. 1) a equação de Bernoulli para o orifício de entrada nos dá:

$$\frac{P_e}{\gamma} = \frac{v^2}{2g} + \frac{P_{st}}{\gamma}$$

mas:

$$\frac{P_e}{\gamma} = h + t$$

$$\frac{P_{st}}{\gamma} = t$$

substituindo, vem:

$$h = \frac{v^2}{2g} \quad \therefore v = \sqrt{2gh}$$

Tendo em vista influências perturbadoras no orifício de montante, bem como outras perdas, a expressão necessita um coeficiente de correção:

$$v = c \sqrt{2gh} \quad (1)$$

O coeficiente  $C$  varia com a velocidade, achando-se para as velocidades comuns nos sistemas de abastecimento de água entre 0,8 e 0,9. É determinado experimentalmente para cada tipo de instrumento.

Para o modelo Cole, baseado em experiências de laboratório realizadas em diversas épocas (ref. 6) o eng.º Isaac Zingerevitz determinou a seguinte expressão que relaciona o coeficiente e a velocidade:

$$CV^{0,0121} = 0,893 \quad \text{para } V \text{ em pés/s}$$

$$CV^{0,0121} = 0,911 \quad \text{para } V \text{ em m/s.}$$

válida para o intervalo --  $0,2 \text{ m/s} \leq V \leq 10,0 \text{ m/s}$ .

A fim de evitar colunas de águas demasiadamente altas, cuja medida não seria prática, lê-se a diferença  $h$  por meio de um manômetro diferencial de dupla coluna de um líquido indicador colorido mais pesado do que a água (tubo U — fig. 2).

sendo

$$P_d = \text{pressão diferencial}$$

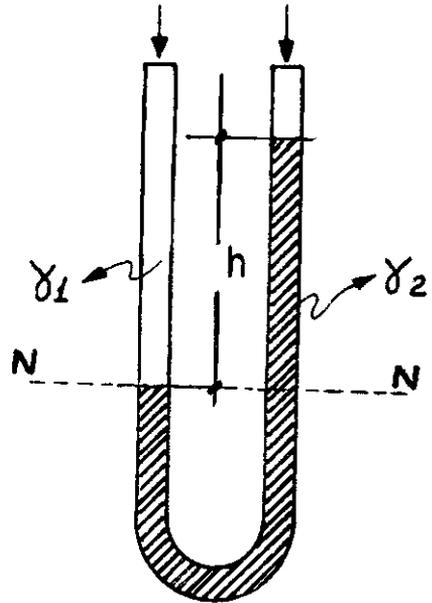


Fig. 2

O equilíbrio de pressões em relação ao nível  $N-N$ , dá:

$$P_d + \gamma_1 h = h_2$$

$$P_d = (\gamma_2 - \gamma_1) h$$

mas

$$\frac{P_d}{\gamma_1} = \frac{v^2}{2g}$$

substituindo:

$$v^2 = \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_1} \cdot 2gh$$

ou, introduzindo o coeficiente de correção, e para  $\gamma_1 = 1,00$  vem:

$$v = C \sqrt{(\gamma - 1) 2gh} \quad (2)$$

Utilizam-se geralmente como líquidos indicadores o tetracloreto de carbono para  $d = 1,60$  e o tetrabromoetano — para  $d = 3,00$ .

Para  $d = 1,25$ , pode-se utilizar o tetracloreto de carbono diluído com benzina ou o sulfureto de carbono.

Excepcionalmente mercúrio também pode ser empregado, para velocidades muito altas.

Os valores de  $v$  acham-se tabulados para diferentes líquidos manométricos e para os dois tipos de pitômetro mais utilizados.

### 3. COLOCAÇÃO DO INSTRUMENTO NAS TUBULAÇÕES — TIPOS DE INSTRUMENTOS

3.1 A inserção do instrumento faz-se através de um registro de derivação tipo macho (corporation cock) de 1" (fig. 3). Este é colocado no tubo, em carga, por meio de uma máquina igual a empregada para execução de ligações domiciliares. A colocação de registro de derivação em tubulações de concreto pretendido somente é possível em casos especiais.

3.2 - Os modelos de pitômetro mais empregados são o modelo Cole e o modelo Simplex.

No primeiro, os orifícios de jusante e montante acham-se alinhados (fig. 4). A passagem através do registro de derivação só se dá na posição «fechada», isto é, com as pontas voltadas para dentro.

Grande vantagem da disposição simétrica é verificar instantaneamente a reversão do sentido de escoamento, registrando-a. Além disso, girando-se o instrumento de  $180^\circ$  durante a medição, pode-se constatar qualquer obstrução que venha a falsear as leituras.

Outro modelo comercial, de bastante uso é o «Simplex» (fig. 5) onde a pressão de referência é medida em um orifício lateral situado a  $90^\circ$  do orifício de impacto. Essa disposição permite determinar o sentido de escoamento nas canalizações, pois o instrumento colocado em posição inversa, não indica deflexão. Confere também maior robustez ao instrumento, pois as pontas do modelo reversível são bastante deformáveis. Todavia não se pode constatar a existência de obstruções.

#### 3.3 - Registradores de velocidade

O modelo Cole registra as velocidades por meio de uma fotografia contínua das flutuações das deflexões do tubo U, tomada diretamente sobre uma folha de papel fotográfico, colocada sobre um tambor rotativo, acionado por um mecanismo de relojoaria. Este conjunto é colocado dentro de uma caixa de madeira, ficando na parte externa o tubo U, bem como uma lâmpada (fig. 6, a e b). Mudando-se uma roda dentada, o tambor pode dar uma volta cada 12 h, 24 h ou 48 h. A fim de que a imagem sobre o papel fotográfico seja nítida, empre-

ga-se um prisma que concentra o feixe luminoso sobre uma fenda vertical existente na caixa. Antes de colocar o registrador em funcionamento, é necessário ajustar o foco sobre o papel e o zero do tubo U.



Fig. 3 — Registro de derivação instalado.

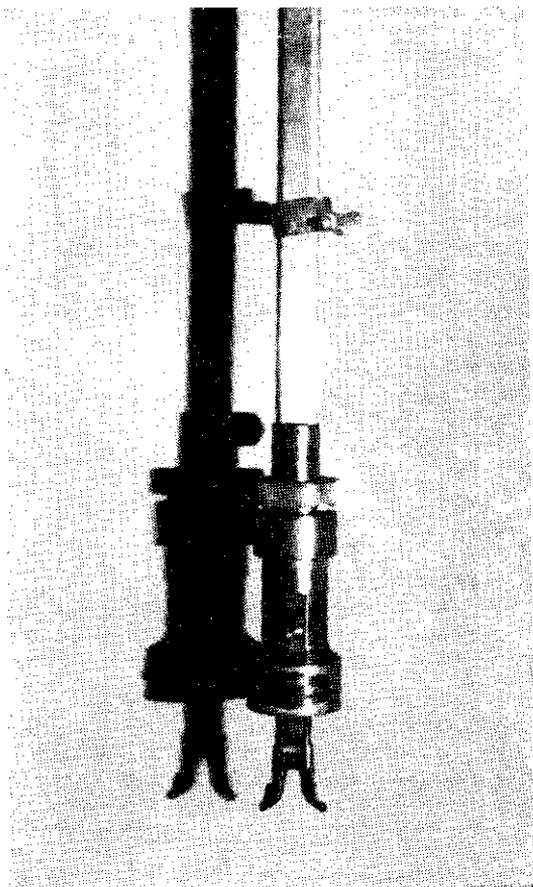


Fig. 4 — Pitômetro modelo Cole.

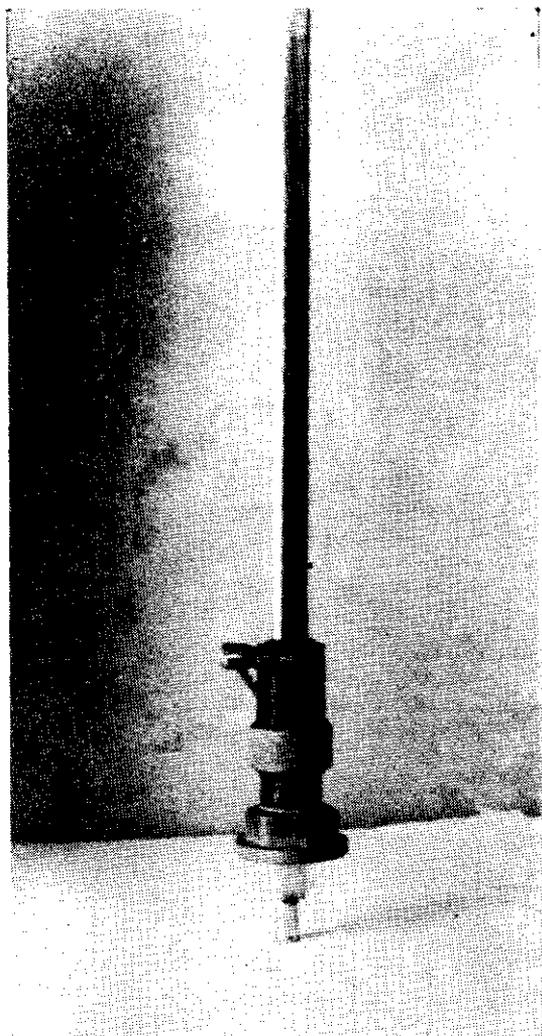


Fig. 5 — Pitômetro modelo «Simplex».

No modelo Simplex o registro das velocidades se faz diretamente sobre um gráfico circular. O instrumento (fig. 7) é constituído de uma câmara contendo mercúrio, sobre o qual se acha um flutuador ligado a um came. Este aciona o mecanismo de transmissão que move a pena. O came é calculado de maneira que o resultado inscrito no gráfico seja diretamente a velocidade. Todas as vezes que for utilizado ou transportado, necessita ser testado e calibrado por meio de colunas de água em dois tubos de vidro colocados no aparelho.

### 3.4 — Precisão teórica de indicação

Assumindo como constante o coeficiente do instrumento, a fórmula do pitot pode ser escrita:

$$v = c h^{1/2}$$

diferenciando essa expressão:

$$dv = \frac{1}{2} dh$$

ou,

$$\epsilon v = \frac{dv}{v} = \frac{1}{2} \frac{dh}{h} = \frac{1}{2} \epsilon h$$

ou seja, o erro relativo de velocidade é igual a metade do erro de medida da diferença entre as colunas líquidas.

O erro máximo relativo dar-se-ia nas pequenas deflexões, como via de regra, não se medem deflexões menores que 50 mm e, admitindo-se um erro de  $\pm 1$  mm nessa leitura, esse erro seria:

$$\epsilon h = \frac{1}{2} \frac{1}{50} \cdot 100 = \pm 1\%$$

Para deflexões maiores, esse erro diminuiria, no entanto outras condições influenciando na medição, pode tomar como erro admissível  $\pm 1\%$ .

## 4. CONDIÇÕES QUE PODEM AFETAR A MEDIDA DAS VELOCIDADES

### 4.1 — Influência da obliquidade da trajetória das partículas

O escoamento é oblíquo quando o eixo do orifício de impacto não está paralelo à trajetória descrita pelas partículas e faz com ela um ângulo  $\alpha$ . Este ângulo pode ocorrer de duas maneiras:

a) Quando o pitômetro não for colocado no alinhamento da tubulação. O orifício achase colocado de maneira a formar um ângulo com a direção da velocidade  $v$ , assumida aqui como constante.

Neste caso pode-se observar, que até  $10^\circ$  de inclinação aproximadamente, nenhuma alteração se nota na deflexão, ou melhor, até esse valor o tubo de Pitot continua a dar indicação correta da velocidade. Sob o ponto de vista prático isto é de bastante utilidade, pois demonstra ser suficiente alinhar o pitômetro pela vista com cuidado, especialmente no caso de pequenos diâmetros.

b) Este caso aparece, por exemplo, quando uma curva situada a montante do ponto de medição provoca desvio das linhas de corrente. Então a direção da velocidade  $v$  forma um ângulo com a posição da haste. É necessário

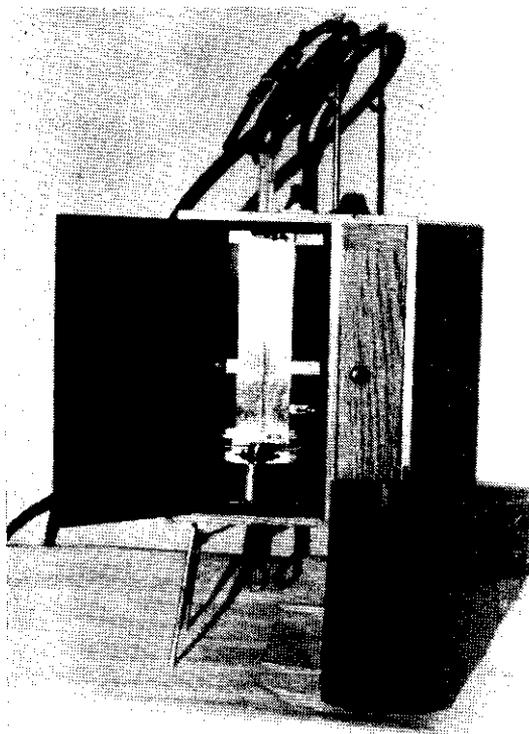


Fig. 6a — Registrador para o modelo Cole, o papel fotográfico é colocado sobre o cilindro.

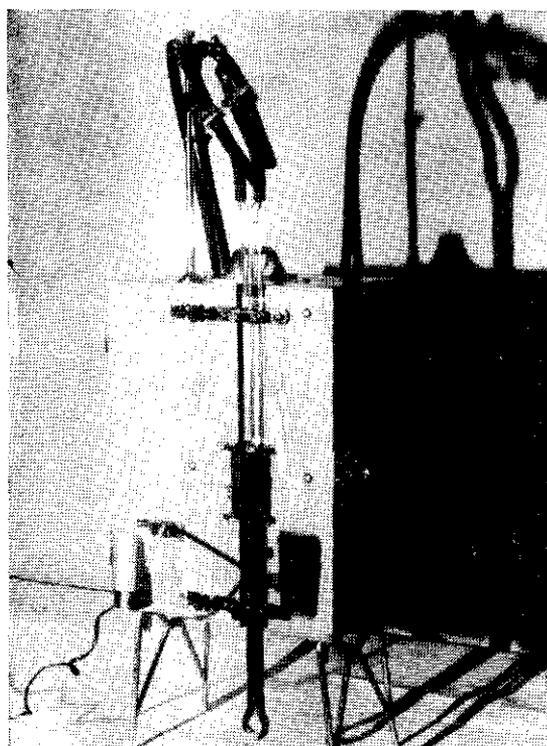


Fig. 6b — Registrador para modelo Cole, o tubo «U» está na parte anterior bem como a lâmpada.

então medir a componente  $v \cos \alpha$ . Porém da mesma maneira que a deflexão  $h$  se mantém praticamente inalterada ao girar-se a haste alguns graus, em ambas as direções, a menos que este ângulo exceda a  $16^\circ$ , a deflexão indicada correspondente será a  $v$ . Em consequência o valor de  $\sqrt{2gh}$  obtido é sempre maior que o valor de  $v \cos \alpha$ . A diferença depende em parte da forma do orifício de impacto. Para orifícios do tipo da fig. 8b a curva mostra a relação entre o ângulo  $\alpha$  e o valor de  $\sqrt{2gh}$ , expresso em porcentagem da componente  $v \cos \alpha$  (ref. 2). Ai pode-se observar que essa porcentagem somente assume valores significativos para  $\alpha > 8^\circ$ . Este efeito é grandemente minimizado escolhendo-se um ponto de medição distante 10 a 12 diâmetros, pelo menos, de qualquer curva, registro ou outro qualquer elemento que possa causar desvio na trajetória do escoamento. Estas condições são de caráter geral, evidentemente, sendo necessário considerar as peculiaridades de cada caso, na escolha do ponto de medição.

#### 4.2 Influência da turbulência do escoamento

Em escoamento turbulento a velocidade local não sendo constante sofre uma variação de intensidade  $\pm \Delta v$ . Esta variação provoca uma alteração na pressão dinâmica (pulsação) que varia com o quadrado da velocidade:

$$P_d = \frac{(v \pm \Delta v)^2}{2g} = \frac{v^2 \pm 2v \Delta v + \Delta v^2}{2g}$$

desde que, num período definido de tempo as parcelas  $\pm 2v \Delta v$  se cancelam mutuamente, a pressão média dinâmica torna-se:

$$P_{dm} = \frac{v^2 + \Delta v^2}{2g} = \frac{v^2}{2g} \left[ 1 + \frac{\Delta v^2}{v^2} \right]$$

Se as velocidades forem obtidas através das médias das pressões (deflexões) o valor será maior do que o real. Nas leituras diretas este efeito pode ser evitado calculando-se a velocidade média no ponto através da média das velocidades individuais, medidas cada 15 ou 30 s.

Por outro lado, no escoamento turbulento as partículas percorrem trajetórias que desviam de instante a instante do sentido geral do escoamento, provocando variações contínuas no ângulo de aproximação  $\alpha$ . Em consequência a velocidade real  $v$  é menor do que a velocidade observada:  $v \cos \alpha$ .

Estes efeitos, bem como outros de menor importância foram objeto de numerosos ensaios de laboratório (ref. 4). No primeiro caso veri-

ficou-se que as pulsações causam pequena alteração na velocidade observada. Pode-se provar, no entanto, que é necessário uma pulsação de 25% na altura de velocidade ( $h_v$ ) para causar um erro de 1% na média das velocidades observadas.

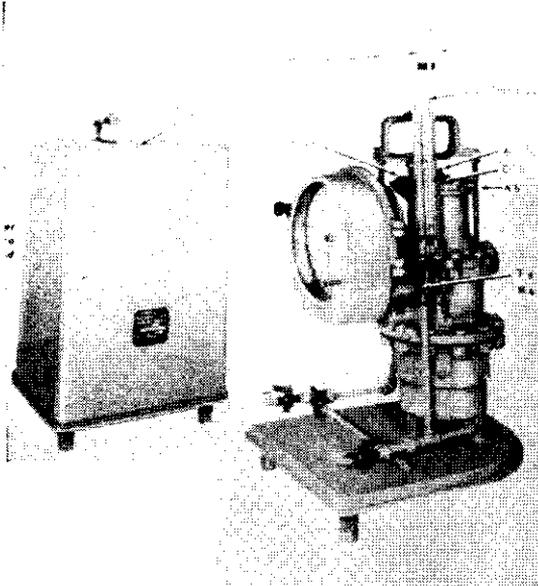


Fig. 7 — Registrador para modelo «Simplex».

No que se refere as variações do ângulo de aproximação verificou-se que o ângulo médio é menor que 3°, valor esse independente do diâmetro da tubulação. Tal valor não provoca erro apreciável, conforme se vê no gráfico da fig. 8.

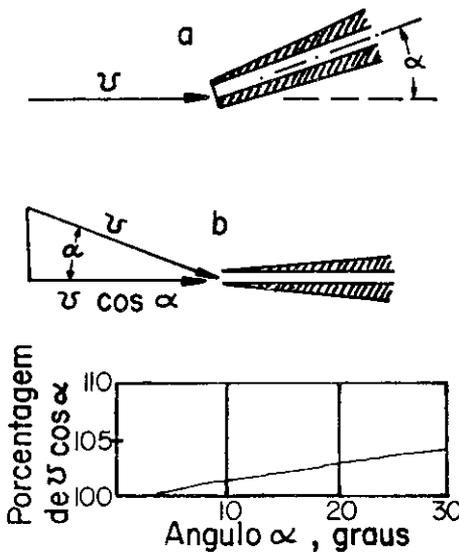


Fig. 8

#### 4.3 — Observações sobre as medidas com o Pitot

Do que foi exposto anteriormente pode-se dizer, em resumo, que se o tubo de Pitot não indica a deflexão verdadeira num determinado ponto, em escoamento turbulento, é por que há uma obstrução parcial ou total em uma ou em ambas tomadas de pressão.

É também necessário notar que a precisão dos resultados de medições depende também, em grande parte da experiência dos observadores. Resultados de confiança somente podem ser obtidos por observadores bem treinados.

Ensaio de laboratório mostraram também que uma fonte importante de erros é a forma imperfeita dos meniscos que pode conduzir a erros de 10% ou mais. Os meniscos perdem sua forma quando o tubo não está perfeitamente limpo ou, quando o líquido permanece no tubo muito tempo (horas) sem ser trocado. A realização dessas condições é pois de grande importância.

A fim de minimizar os erros, faz-se uma ou duas séries de leituras em intervalos regulares (15 ou 30 s) durante 10 ou 15 min. O valor mais provável será a média aritmética das velocidades.

A pesar de ser um instrumento bastante sensível o Pitot não o é para pequenas velocidades. Deflexões abaixo de 3,5 cm não são lidas com precisão. Isto corresponde a 0,30 m/s aproximadamente para líquidos de densidade 1,25. Por outro lado o uso de mercúrio como líquido indicador permite a leitura de velocidades até 9, 5 m/s aproximadamente.

### 5. MEDIDAS DE VAZÃO

#### 5.1 — Princípio Geral

A medição indireta de vazões através de instrumentos indicadores de velocidade obriga à integração dos valores parciais.

Obtidas as velocidades locais pode-se construir a curva de velocidades  $v = f(r)$  segundo a direção de um dos diâmetros.

A vazão elemental através de um anel circular de raios  $r$  e  $r + dr$  é:

$$dQ = 2\pi r v dr$$

A vazão total será:

$$Q = \int_0^R dQ = 2\pi \int_0^R r v dr$$

A integração dessa expressão apresentando grandes dificuldades, sua resolução é geralmente feita por processo gráfico ou analítico.

A área de cada anel é dada por:

$$a = 4\pi R \sqrt{\frac{2n-1}{2n}} \left( 1 - \frac{2n-1}{2n} \right)$$

e, os raios médios de cada anel sendo:

$$r_1 = R \sqrt{\frac{2n-1}{2n}}$$

$$r_2 = R \sqrt{\frac{2n-3}{2n}}$$

onde R é o raio da secção do tubo.

Seja:

$\bar{v}$  ..... velocidade média na secção

$v_c$  ..... velocidade média central

fazendo

$$f = \frac{\bar{v}}{v_c}$$

A relação f denomina-se fator de velocidade — F.V. Sobre ela e sua obtenção falar-se-á posteriormente.

Sendo

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

substituindo êsses valores em v, vem:

$$Q = A f v_c$$

Os valores de A e  $v_c$  sofrem porém algumas correções, dependentes das circunstâncias da medição.

## 5.2 — Correção de diâmetro

O diâmetro interno das tubulações é quasi sempre alguns milímetros maior ou menor que o nominal. Tubulações de ferro fundido, com certo tempo de uso têm seu diâmetro interno reduzido pelas concreções formadas. Assim, sendo o cálculo baseado no diâmetro nominal, é necessário determinar o diâmetro real por meio de um calibrador (fig. 10). Este instrumento é constituído por uma vara que atravessa uma tampa engachetada possuindo um gancho na extremidade. Essa tampa é rosqueada no registro de derivação.

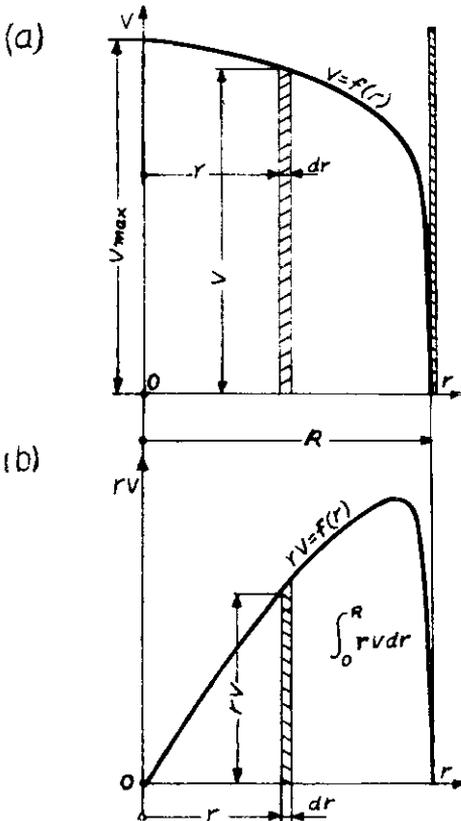


Fig. 9

### 5.1.1. — Processo gráfico

Constroem-se a curva com os produtos  $rv$  (fig. 9b) e mede-se com planímetro a área sob a curva  $rv = f(r)$ . Esta área, multiplicada por  $2\pi$  e pela unidade de desenho dá-nos o valor de Q.

### 5.1.2 — Processo analítico

É o mais empregado. Divide-se a secção transversal em  $n$  elementos anulares medindo-se a velocidade no centro de cada elemento, na direção de um diâmetro, pelo menos.

Sendo  $a$  a área de cada anel e  $A$  a área da secção:

$$Q = \sum_{i=1}^n a_i v_i$$

Se as áreas dos anéis forem iguais:

$$a = \frac{A}{n} \text{ e, } Q = a \sum_{i=1}^n v_i = \frac{A}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

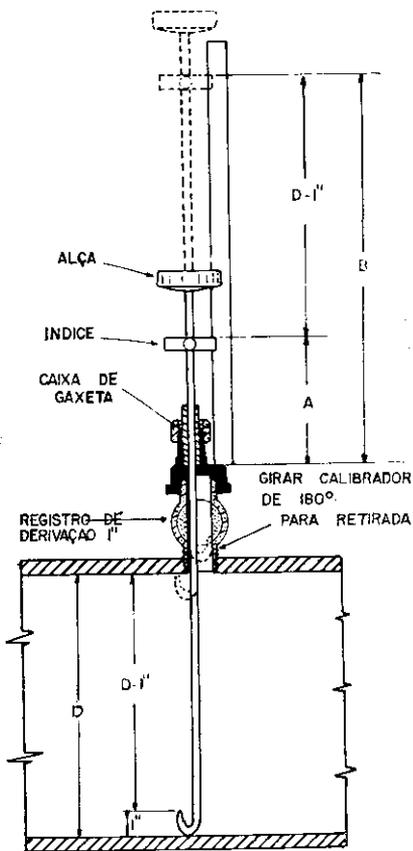


Fig. 10 — Calibrador de tubulação.

Sendo:

$D_n$  .....  $\varnothing$  nominal

$D_r$  .....  $\varnothing$  real

A correção a ser aplicada será: (Gráficos 1 e 2):

$$k_1 = \frac{D_r^2}{D_n^2}$$

### 5.3 — Correção da projeção do registro de derivação

Dependendo da espessura da parede do tubo o registro de derivação pode apresentar uma projeção interna, que reduz a área da secção. Correspondente a essa redução determinou-se, experimentalmente, o coeficiente  $k_2$ , que se multiplica pelo valor da vazão. Seu valor acha-se em tabelas e gráficos (Ref. 7 e Gráfico 3). Esta correção, no entretanto só é significativa para diâmetros abaixo de 300 mm, inclusive.

### 5.4 — Correção de densidade

Por motivos diversos, entre os quais a variação da temperatura é o principal, o valor real

da densidade dos líquidos indicadores nem sempre é igual ao nominal. Assim é necessário determinar seu valor real, logo após a medição. Se o cálculo da velocidade fôr feito por tabelas baseadas na densidade nominal é necessário determinar a respectiva correção.

A densidade real pode ser medida por um densímetro, ou, mais simplesmente, determinada pelo processo abaixo descrito, fazendo (fig. 11):

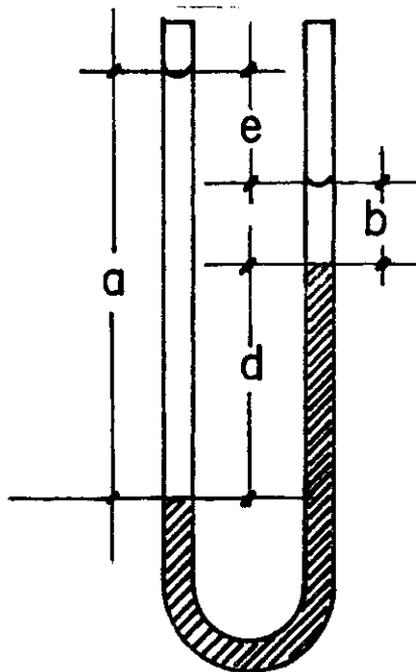


Fig. 11

$\gamma_a$  ..... densidade da água

$\gamma'$  ..... densidade real do líquido.

o equilíbrio das colunas líquidas nos dá:

$$\gamma_a \cdot a = \gamma' \cdot d + \gamma_a \cdot b$$

$$\therefore \gamma_a = \frac{a-b}{d}$$

para

$$\gamma_a = 1$$

mas

$$a - b = d - e$$

portanto:

$$\gamma' = 1 - \frac{e}{d}$$

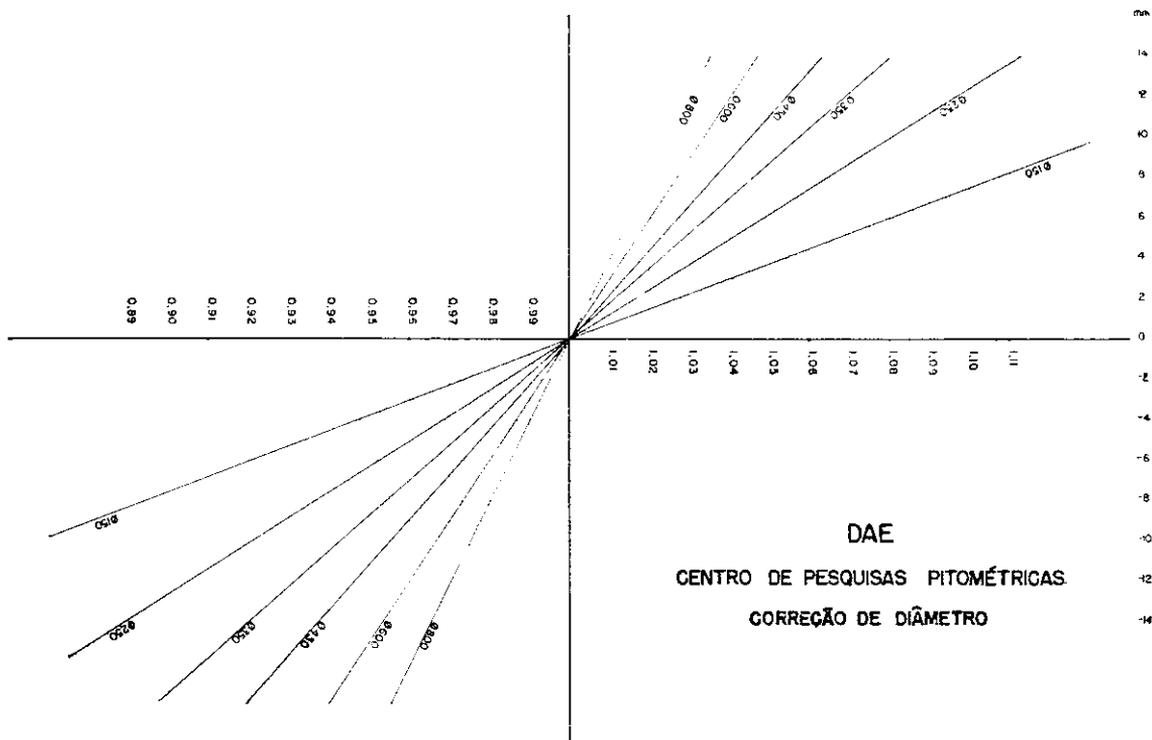


Gráfico 1

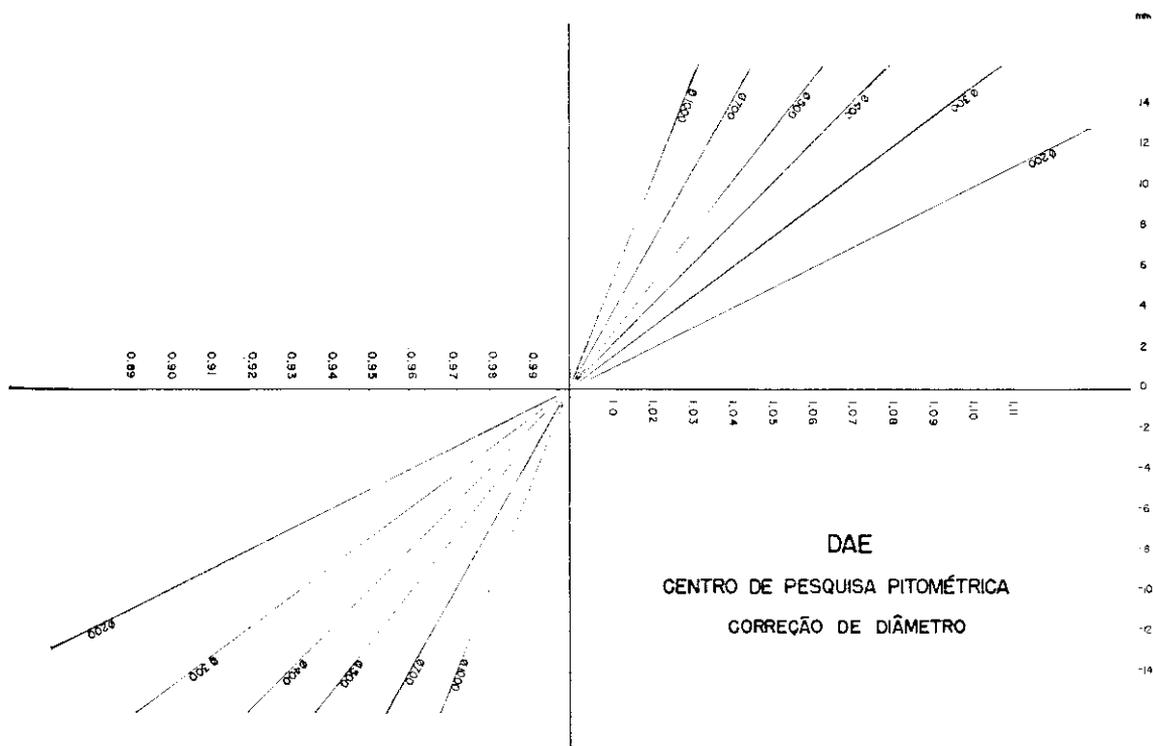


Gráfico 2

SAEC  
CPP

FATORES PARA CORREÇÃO DA ÁREA DE TUBULAÇÕES  
REDUÇÃO CAUSADA PELA ÁREA PROJETADA DO REGISTRO DE DERIVAÇÃO

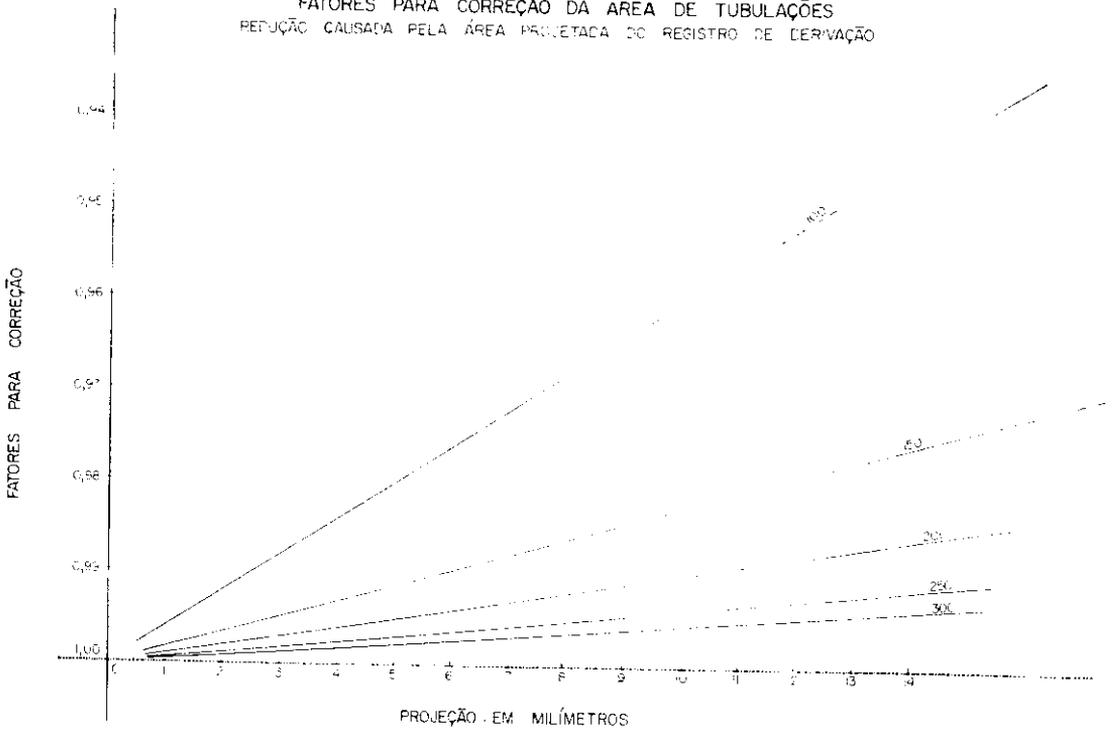


Gráfico 3

SHF  
14/8/70

Sendo  $\gamma$  a densidade nominal do líquido a correção a ser aplicada aos valores fornecidos pelas tabelas, será (Gráficos 4, 5 e 6):

$$k_s = \sqrt{\frac{\gamma - 1}{\gamma' - 1}}$$

Terminada a medição devem ser feitas três ou mais determinações de densidade.

### 5.5 — Obstrução provocada pela haste do Pitot

Com o instrumento em posição a área da secção fica diminuída da área de projeção da haste do pitômetro. Em consequência as velocidades crescem acima do valor que teriam se o instrumento não estivesse presente. A correção desta influência se faz indiretamente. Através de medidas em laboratório determina-se uma área ideal (área corrigida) que, multiplicada pela velocidade média determinada pelo pitômetro, dá como resultado a vazão real. Esses valores acham-se tabelados (Tabela 1) e, em função deles o eng.º Hitoshi Kamamoto determinou a seguinte expressão:

$$\log A_c = 0,0198D - 2,1090$$

onde

$A_c$  ..... área corrigida

$D$  ..... diâmetro nominal correspondente.

Esta expressão refere-se ao pitômetro colocado no centro da tubulação visto que a relação entre as velocidades média e central (F.V.) não se altera por este efeito, como se verá mais adiante.

### 5.6 — Determinação do fator de velocidade

O fator de velocidade é, como já se viu (cf. 5.1) a relação entre a velocidade média e a central. É obtido levantando-se a curva de velocidades na secção respectiva. As velocidades, por sua vez, são lidas em pontos simétricos em relação ao centro da tubulação. Supondo que as correções referentes a obstrução provocada pela haste fossem feitas em relação a velocidade central, para duas posições simétricas teríamos, para a superior uma correção para mais e para inferior uma correção para menos. Denominando:

$a_1$  ..... área da projeção da haste na posição superior.

TABELA I

Obstrução causada pelo pitômetro colocado no centro

Ø (mm)	A (m <sup>2</sup> )	Ø (mm)	A (m <sup>2</sup> )
100	0,007557	1000	0,77734
150	0,017048	1100	0,94174
200	0,030426	1200	1,1221
250	0,047650	1250	1,2183
300	0,068828	1300	1,3183
350	0,093884	1400	1,5304
375	0,10787	1500	1,7585
400	0,12284	1600	2,0027
450	0,15572	1800	2,5386
500	0,19253	2000	3,1386
550	0,23321	2200	3,749
600	0,27791	2500	4,826
625	0,30172	3000	6,990
650	0,32651		
675	0,35235		
700	0,37905		
750	0,43555		
800	0,49599		
900	0,62874		
950	0,70105		

Fórmula elaborada pelo Eng.<sup>o</sup> Hitoshi Kamamoto

$$\text{Log } f = \text{Log } A_0 + m \text{Log } \frac{D}{D_0}$$

$a_2$  ..... área de projeção da haste na posição central.

$a_3$  ..... área da projeção da haste na posição inferior.

A ..... área da tubulação.

As correções seriam proporcionais a:

$$\frac{a_1 - a_2}{A} \text{ e } \frac{a_2 - a_3}{A}$$

Sendo

$$a_1 - a_2 = a_2 - a_3$$

as correções serão iguais e de sentido contrário. Ao somar as velocidades locais para obtenção da velocidade média essas correções cancelam-se mutuamente. Apenas a forma da curva de velocidades altera-se um pouco, sendo as velocidades abaixo do centro da tubulação um pouco mais altas.

O processo adotado aqui, para medições de vazão, segue as especificações da norma inglesa B.S. 1042:1943, adotando-se duas simplificações:

a) sendo bastante difícil posicionar o pitômetro exatamente no centro de cada anel, a curva é feita colocando-se o pitômetro em 10 pontos equidistantes.

b) a curva é construída com os valores da deflexão  $h$  nesses pontos. Essa curva é comumente denominada «traverse».

Desenhada a curva retiram-se dela os valores das deflexões nos centros dos anéis de igual área, nos pontos de ordenada 0,316 — 0,548 — 0,706 — 0,836 — 0,948R, acima e abaixo do centro. A média das raízes quadradas dessas deflexões dividida pela raiz da deflexão no centro nos dá o fator de velocidade:

$$f = \frac{\sum \sqrt{h}}{10} \cdot \frac{1}{\sqrt{h_c}}$$

As figs. 12 e 13 mostram dois traverses, um numa linha de pequeno diâmetro e o outro em linha de grande diâmetro.

A uniformidade na distribuição das velocidades é condição essencial para exatidão de medidas e portanto para escolha do ponto de medição.

O valor do FV se mantém constante por longo tempo. Altera-se porém com a mudança das condições de rugosidade das paredes. Não obstante ser o valor teórico 0,83, como é possível demonstrar, assumindo-se a curva de velocidades como sendo uma semi-elipse, para a grande maioria dos casos o valor do FV acha-se compreendido entre 0,70 e 0,90. É preciso notar que abaixo da velocidade crítica o valor do FV deixa de ser constante. A fim de se obter maior precisão na integração executam-se traverses seguindo dois diâmetros em ângulo reto.

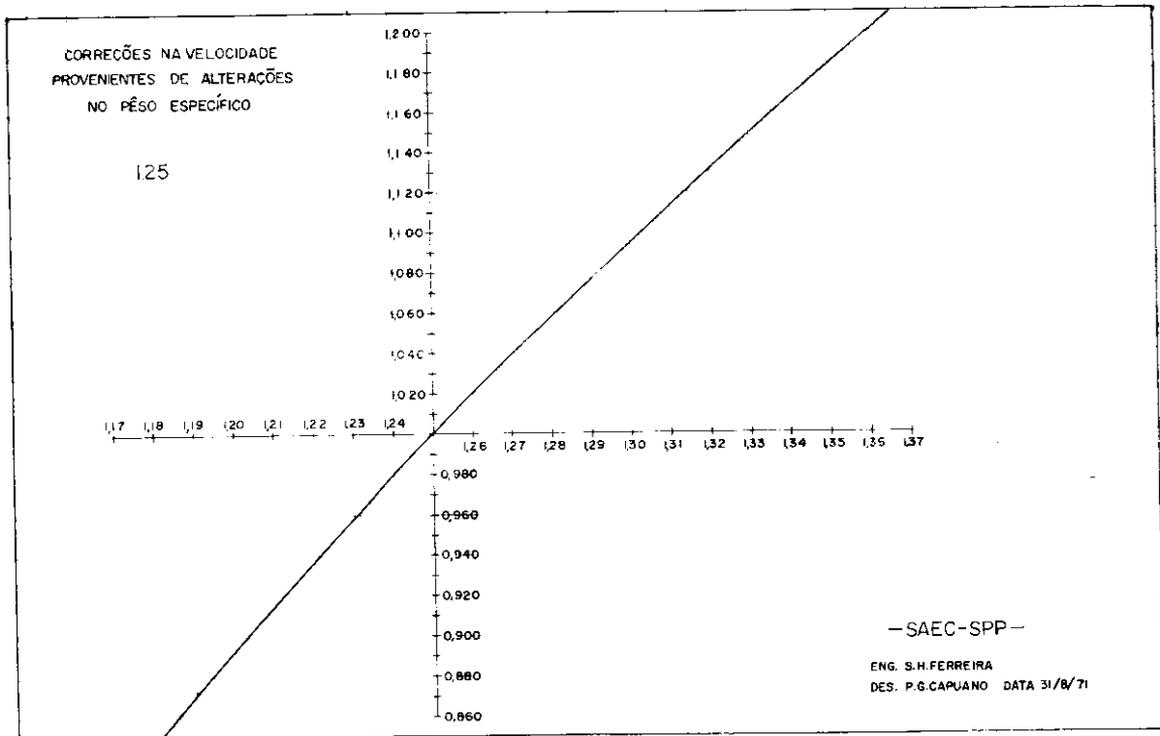


Gráfico 4

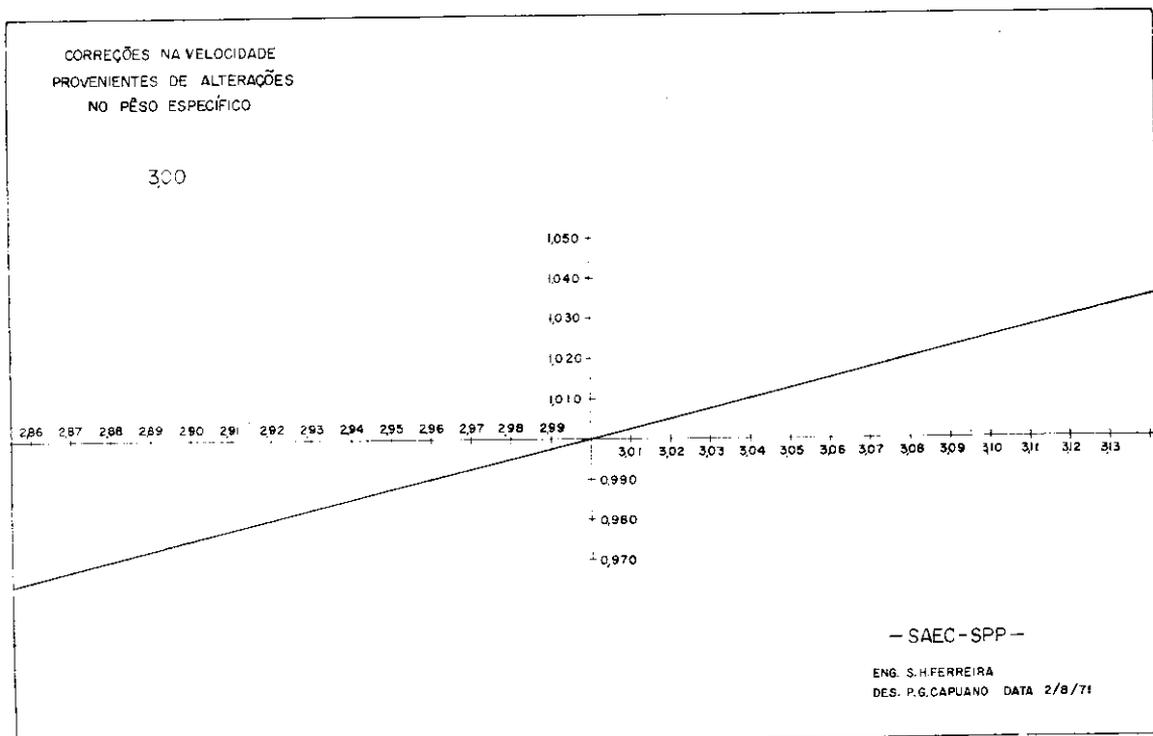


Gráfico 5

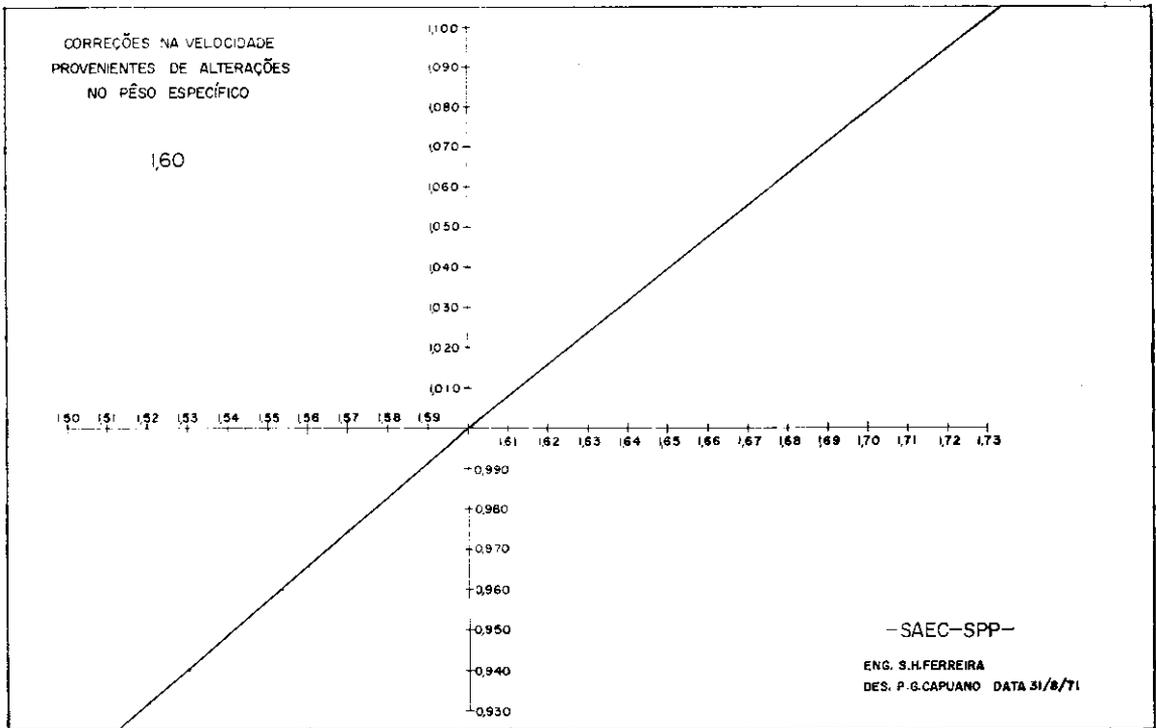


Gráfico 6

#### 5.6 — Observações sôbre a execução de traverses

O regime de escoamento nas redes de abastecimento sendo, por assim dizer, quasi-permanente, sofrendo variações dificilmente controláveis, obriga a execução de traverses no menor espaço de tempo possível. É preciso então estimar a deflexão média em cada ponto, observando-se o ciclo completo de pulsações nesse ponto. Dependendo da experiência do observador isto é feito num intervalo maior ou menor de tempo. Durante o tempo de execução a vazão deverá permanecer constante. A fim de se comprovar isto deve-se voltar a ler a deflexão no centro, após a leitura no último ponto. No caso de grandes diâmetros ou, da existência de zonas de turbulência deverão ser observados pontos intermediários, além dos 10 usuais.

#### 5.7 — Computação da vazão instantânea

Instalado o registro de derivação em local suficientemente isento de perturbações, calibrada a linha e, determinado o fator de velocidade, após uma série de leituras suficientemente grande é obtida a velocidade média central; a vazão será então:

$$Q = k_1 k_2 k_3 f V_c A_c$$

onde os símbolos têm o significado já mencionado.

#### 6. ALGUMAS APLICAÇÕES PRATICAS

A principal aplicação está no levantamento hidráulico de um sistema de abastecimento de água. Incluem-se todos os seus elementos, desde a captação, passando pelas linhas de adução, linhas tronco, estações elevatórias, redes distribuidoras até a medição final para entrega ao consumidor. O resultado desse levantamento dará uma base real para a estimativa das diferentes classes de consumo no futuro. Juntamente com o estudo do crescimento da população fornece dados seguros para projetos de ampliação ou remodelação do sistema. Por outro lado a operação de rotina do sistema pode ser feita em termos das necessidades reais dos diversos setores de abastecimento. No caso de uma situação anormal em que um determinado dispositivo não estiver em funcionamento, pode-se determinar que vazões podem ser veiculadas à área por êle abastecida e de que maneira. A elaboração deste estudo exige, naturalmente, o emprego de método de simulação por cálculo ou por analogia. O emprêgo de computadores digitais ou analógicos veio facilitar grandemente o emprêgo deste método.

DIAM. 300 mm DIST. 9-I ZONA \_\_\_\_\_  
 DENS. 1,25 LOCALIZAÇÃO R. MATIAS CARDOSO Nº806  
 DATA 2-12-69 ENGENHEIRO J.H.S - WP

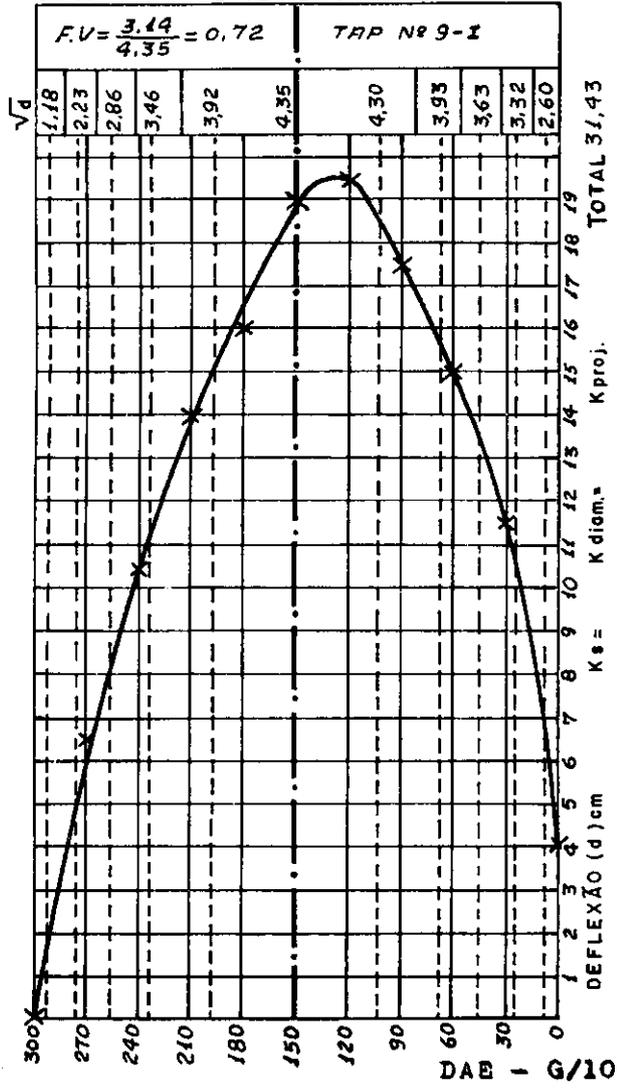


Fig. 12 — Traverse em uma linha de  $\varnothing 300$  mm. As linhas tracejadas indicam os centros dos anéis de igual área. As linhas cheias dividem o diâmetro em 10 partes iguais.

DIAM. 1500 mm DIST. 64-I ZONA \_\_\_\_\_  
 DENS. 160 LOCALIZAÇÃO R. VISC. P. SEGURO Nº64  
 DATA 9-2-70 ENGENHEIRO S.H.F

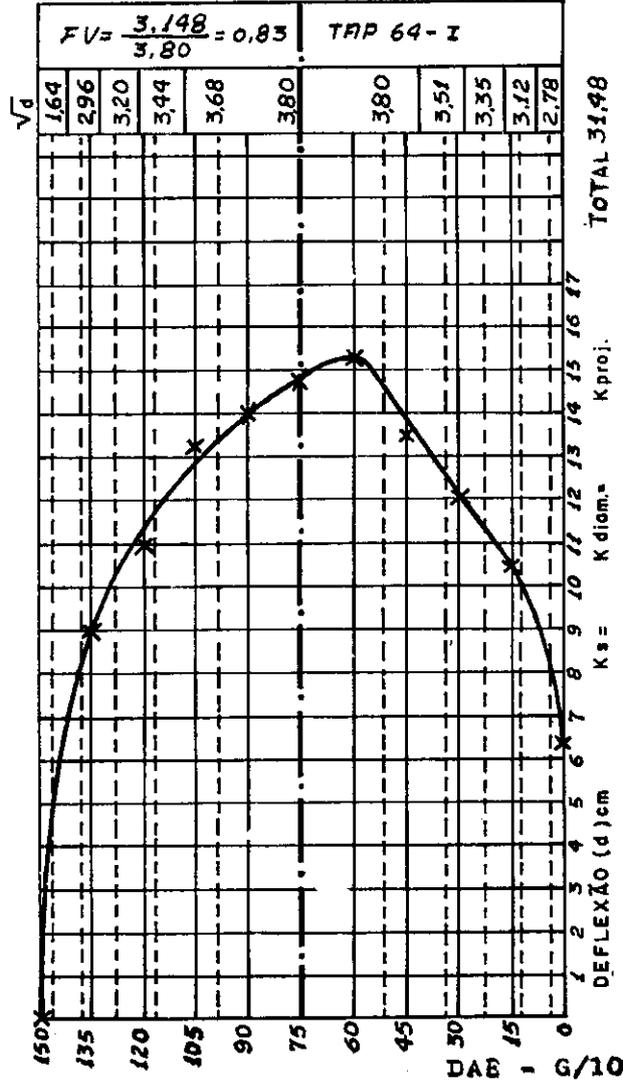


Fig. 13 — Traverse em uma linha de  $\varnothing 1500$  mm.

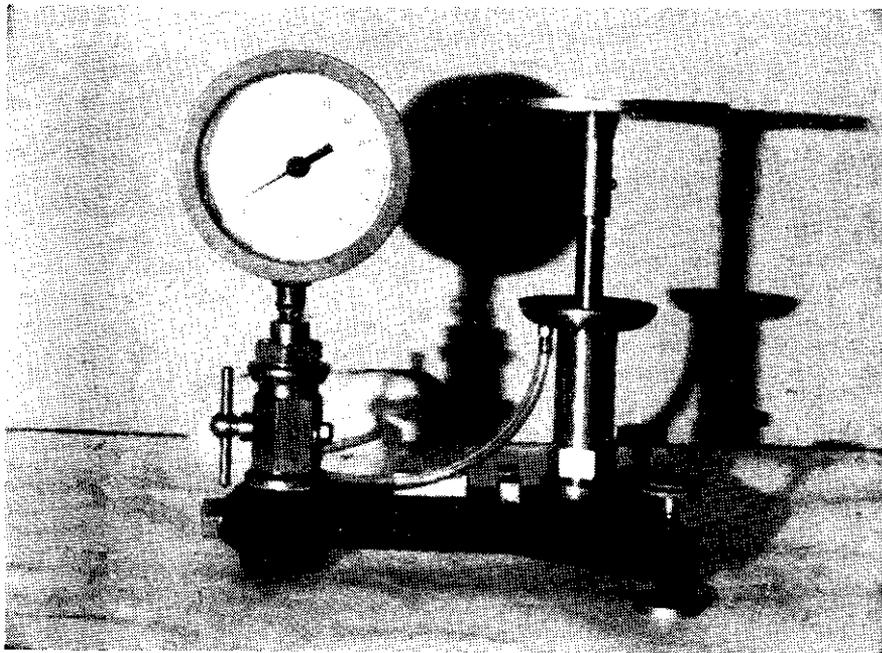


Fig. 14 — Prensa calibradora de manômetros.

As principais etapas do levantamento hidráulico acham-se descritas nos parágrafos que se seguem.

#### 6.1 — Estudo de um sistema de sub-adutoras e linhas tronco

A finalidade deste estudo é coletar dados referentes a circulação de água nos vários troncos e linhas de alimentação de um sistema. Consiste numa investigação completa dessas linhas para conhecer o funcionamento de cada uma delas sob as condições normais de trabalho.

São obtidos basicamente dois tipos de dados:

a) Vazões veiculadas pela linha principal e derivações mais importantes, registradas no espaço de 24 h pelo menos.

b) Perdas de carga (coeficientes da fórmula de Hazen e Williams).

Este valor se obtém determinando-se as diferenças entre as cotas piezométricas de dois pontos apropriadamente escolhidos. Para que os resultados possuam boa precisão é necessário que a distância entre os pontos de medida seja suficientemente grande de maneira a que a perda de carga não seja muito pequena (pelo menos 1,5 mca). Em cada um dos pontos faz-se

medida simultânea de vazão e pressão. A pressão é medida com um manômetro visual de precisão, nos casos comuns, ou se a pressão for suficientemente pequena, com um tubo U com mercúrio. No primeiro caso é necessário testar os manômetros nos locais onde foram feitas as medidas forem realizadas, por meio de uma prensa calibradora (fig. 14). A pressão  $h$  assim obtida, em metros de coluna de água, adicionada a cota geométrica do local  $z$ , nos dá a cota piezométrica do local. A perda de carga total será:

$$h_f = (h_1 + z_1) - (h_2 + z_2)$$

onde os índices 1 e 2 referem-se aos pontos de entrada e saída respectivamente. Conhecida a distância  $L$  entre os pontos pode-se determinar a perda unitária  $e$ , com a vazão medida, o coeficiente (de atrito ou de resistência) em qualquer das fórmulas usuais. A perda de carga pode também ser obtida por medida direta, lendo-se a pressão diferencial em um tubo U. Dificuldades de ordem prática limitam a extensão do trecho de teste a uns 100-150 m. A perda de carga unitária assim medida, nem sempre pode ser assumida para toda a linha, tendo em vista a influência de outros elementos (curvas, registros, etc.).

Os dados mais importantes são colocados em um mapa das linhas tronco. Junto a cada ponto de medição indicam-se o sentido de escoamento, as vazões média, máxima e mínima, velocidade máxima e mínima, coeficiente da linha, material de que é feita e data da construção da mesma.

Em linhas tronco que interligam reservatórios, sem derivações ou com elas fechadas (subadutoras), muitas vezes é útil realizar o levantamento da linha piezométrica real. Colocam-se então manômetros visuais ou registradores ao longo da linha, lendo-se simultaneamente as pressões e a vazão. Com a finalidade de evitar muitas escavações podem ser aproveitados os pontos acessíveis da linha: registros de parada, ventosas etc. Aferidos os manômetros, os valores das pressões, em metros de coluna de água, são lançados sobre o perfil da linha, permitindo traçar a linha piezométrica real, referente àquela vazão. Qualquer alteração na inclinação da linha indica evidentemente, uma irregularidade: obstrução causada por motivos diversos (bólsa de ar, registro graduado, etc.) ou um vazamento, as vezes desconhecido. Delimitada uma região, a localização mais exata da irregularidade pode ser feita repetindo-se o teste agora com um número maior de tomadas de pressão nessa zona.

## 6.2 — Estudo de redes de distribuição

Faz-se dividindo a rede em distritos totalmente isolados (estanques) nêles determinando-se:

- a) consumo total durante 24 h, pelo menos, e também os consumos máximo, médio e mínimo.
- b) consumo industrial, comercial, público e de grandes consumidores não especificados (escolas, quartéis, hospitais etc.).
- c) sub-registramento dos medidores domésticos e industriais, além do consumo não medido.
- d) vazões disponíveis para incêndio.
- e) vazamentos subterrâneos invisíveis.
- f) pressões disponíveis em diversos pontos.

O tamanho do distrito a ser isolado depende de diversos fatores: diâmetro da linha alimentadora, localização dos registros de limite, etc. Deverá, no entretanto conter em torno de 20-25 km de canalização. Obtida uma medição contínua, durante 24 h, se a relação entre o consumo mínimo noturno e o consumo médio for maior do que se poderia razoavelmente esperar

e, não puder ser explicada pelas leituras dos medidores industriais e outros grandes consumidores contínuos, êste acréscimo pode ser atribuído a existência de vazamentos invisíveis. É difícil fixar com precisão um número, mas admite-se, em geral, que uma porcentagem inferior a 35% é uma indicação clara de que o distrito está relativamente isento de vazamentos. Existe também uma porcentagem de vazamentos inevitáveis, ou cuja detecção, localização e reparação seria mais dispendiosa do que simplesmente ignorá-los. Se a porcentagem encontrada for alta, realiza-se a subdivisão do distrito em áreas menores, durante as horas de consumo mínimo. Nessas horas a relação entre o consumo real e as perdas são máximas. Delimitada uma região (alguns quarteirões) onde essa relação seja grande o vazamento (ou vazamentos) é localizado por escuta, com o emprêgo de amplificadores de som, acústicos ou eletrônicos.

Simultaneamente com essa pesquisa faz-se a leitura dos grandes medidores, sua calibração e a comparação entre o consumo total medido pelo Pitot com o total registrado pelos medidores do distrito. Manômetros registradores colocados em pontos indicam se o abastecimento é ou não uniforme em tôda a área.

## 6.3 — Teste de medidores no campo

Dois são os tipos de medidores comumente usados nos sistemas de abastecimento: os medidores deprimogênicos, tipo venturi, tubo Dall, e os hidrômetros, etc.. Sômente é possível testar no campo, através de comparação com o pitômetro, medidores com diâmetro nominal maior do que 100 mm ou medidores de diâmetro menor se forem alimentado por uma linha de 100 mm.

Não possuindo partes móveis o tubo de Pitot não exige ajuste mecânico, daí ser o instrumento ideal para testes desta natureza.

Nos testes de campo dos medidores deprimogênicos são verificados os seguintes elementos:

a) o elemento gerador da pressão diferencial (tubo Venturi, tubo Dall ou orifício calibrado). A tuberculização do ferro fundido pode alcançar a secção calibrada, reduzindo o diâmetro. Podem também ocorrer depósitos de cal ou de hidróxido de alumínio. A pressão diferencial pode ser medida com um tubo U, contendo líquido indicador apropriado. Êsse valor é comparado com o obtido através da expressão geral para os medidores deprimogênicos:

$$h = k \frac{v^2}{2g} (1 - m^2)$$

onde:

$v$  ..... velocidade na secção contraída

$m = \frac{d}{D}$  ..... relação de constricção

$k$  ..... constante do instrumento.

b) O elemento receptor.

Inclue-se aí o indicador instantâneo, o registrador e o totalizador. Esses elementos são lidos simultaneamente com o tubo Pitot, comparando-se os resultados. O teste deve ter duração suficiente para que o último algarismo do totalizador — no caso de indicadores digitais — ou o último dial para que possa ser lido com precisão. Se possível a vazão deve ser variada de maneira a cobrir a maior faixa possível do campo de medição.

Da mesma maneira os hidrômetros devem ser testados pelos menos em três pontos do campo de medição, à capacidade máxima, mínima e em um valor intermediário.

#### 6.5 — Teste de estações de recalque

O teste completo de uma estação de recalque compreende:

a) levantamento das curvas características dos conjuntos motor-bomba (altura total de carga, eficiência e potência absorvida).

b) levantamento da curva de carga do sistema (vazão-carga total no sistema).

Simultaneamente podem também ser testados os medidores de vazão.

É necessário determinar os seguintes elementos:

##### 6.5.1. — Vazão veiculada pela bomba

É medida por um Pitot convenientemente instalado. Se o ponto estiver suficientemente próximo da estação nêle também poderá ser lida a pressão de entrada para determinação da perda de carga na linha. A pressão de saída poderá ser obtida pela altura de água no reservatório, se a entrada nêle não for por cima.

##### 6.5.2 — Altura total de carga

É a diferença entre a altura total de recalque —  $H_r$  — e a altura total de aspiração —  $H_s$ .

$$H_t = H_r \pm H_s$$

mas,

$$H_r = h_r + \frac{V_r^2}{2g}$$

$$e, \quad H_s = h_s + \frac{V_s^2}{2g}$$

onde:

$h_r$  ..... altura manométrica de recalque

$h_s$  ..... altura manométrica de sucção

portanto:

$$H_t = h_r - h_s + \left( \frac{V_r^2 - V_s^2}{2g} \right)$$

A altura manométrica de recalque é a pressão em metros de coluna de água, lida em um manômetro colocado na flange de compressão. A altura manométrica de sucção é a pressão em metros de coluna de água, lida em um manômetro colocado na flange de entrada da bomba. Será negativa quando houver aspiração e positiva quando a bomba for afogada. Sempre que as condições o permitirem deve ser lida por meio de um tubo U com mercúrio.

As pressões lidas são referidas ao eixo da bomba. Logo após o teste os manômetros empregados deverão ser testados em uma prensa calibradora determinando-se as respectivas correções.

As velocidades de sucção e recalque são obtidas dividindo-se a vazão medida pelo Pitot pela áreas nas flanges de entrada e saída.

##### 6.5.3 — Potência absorvida pelo grupo motor-bomba ( $P_a$ )

É lida diretamente de um wattímetro. Poderá ser o geral da estação se fôr possível colocar cada unidade funcionando independentemente de outras cargas. A instalação de um instrumento para êsse fim já é mais trabalhosa, especialmente se fôr necessário o emprêgo de transformadores de corrente e potencial. A instalação possuindo indicador de fator de potência e, se as indicações do voltímetro e amperímetro forem de confiança, a potência poderá ser determinada indiretamente:

$$P_a = \sqrt{n} E I \cos \varphi$$

onde  $n$  é o número de fases e as outras letras têm os significados usuais.

#### 6.5.4 — Potência útil fornecida pela bomba ( $P_u$ )

Corresponde ao trabalho realizado pela bomba.

$$P_u = \gamma Q H_t \text{ mkg/s} = \frac{\gamma Q H_t}{75}$$

$$CV = 0,0098 \gamma Q H_t \text{ kw}$$

sendo  $Q$  em  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $\gamma$  em  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $H_t$  em mca.

#### 6.5.5 — Rendimento do grupo motor-bomba

$$\rho = \frac{P_u}{P_a}$$

É preciso ter em mente ao comparar-se os valores assim obtidos com a curva de eficiência fornecida pelos fabricantes, que esta, em geral, refere-se a bomba sôzinha. É preciso então levar-se em conta, de alguma maneira a eficiência do motor.

Os próprios elementos básicos são, muitas vezes, indicativos de anomalias causadoras de baixo rendimento. É o caso, por exemplo, de um registro parcialmente fechado na sucção de uma bomba afogada, que fará cair demasiadamente a respectiva pressão. A causa de um baixo rendimento, se não fôr encontrada no sistema hidráulico poderá estar também num erro na medição da potência, ou também, na rotação anormalmente baixa.

#### AGRADECIMENTOS

Desejo expressar meus agradecimentos ao Eng.º Keneth E. Bender da Pitometer Assoc. por me ter facilitado o acesso a grande parte

desta bibliografia, em especial no que se refere a comunicações não impressas.

#### REFERÊNCIAS

1. TROSKOLANSKY, Adam — Hidrometry -- Macmillan, N.Y. — 1960.
2. ADDISON, Herbert — Hidraulic Measurements — Wiley & Sons, N.Y. — 1941.
3. COLE, Edward S. — The Pitot Tube Practice — Trans. A.S.M.E., agosto 1935, pg. 281.
4. HUBBARD, C. W. — Investigation of Errors of Pitot Tubes — Trans. A.S.M.E., agosto 1939, pg. 477.
5. COLE, Edward S. & COLE, E. Shaw — Pitot Tube in Large Pipes — Trans. A.S.M.E., agosto 1939, pg. 465.
6. COLE, E. Shaw — Report on Accuracy — The Pitometer Co., comunicação não impressa.
7. Bulletin n.º 15 The Pitometer Co. N.Y. — 1951.
8. HUDSON, W. D. — Field Testing of Large Meters — Jour. A.W.W.A., Vol. 58, Jul. 1966, pg. 867.
9. HUDSON, W. D. — Reduction of Unaccounted Water — Jour. A.W.W.A., Vol. 52, Fev. 1964, pg. 143.
10. BECKWITH, Homer — Economics of Leak Surveys — J.A.W.W.A., Vol. 56, n.º 5, maio 1964, pg. 575.
12. BENDER, Keneth E. — District Measurement for Location of Underground Leakage and per capita Consumption — Comunicação não impressa, Jun. 1970.
13. BENDER, KENETH E. — Water Waste Survey — Comunicação não impressa — Fev. 1971.
14. HUDSON, W. D. — Water System Design and Basic Water Waste Control Southwest Waste Works Journal, Mar. 1969.