

5.1 - INTRODUÇÃO

A medição de vazão inclui no seu sentido mais amplo, a determinação da quantidade de líquidos, gases e sólidos que passa por um determinado local na unidade de tempo: podem também ser incluídos os instrumentos que indicam a quantidade total movimentada, num intervalo de tempo.

A quantidade total movimentada pode ser medida em unidade de volume (litros, mm³, cm³, m³, galões, pés cúbicos) ou em unidades de massa (g, kg, toneladas, libras). A vazão instantânea é dada a uma das unidades acima, dividida por uma unidade de tempo (litros/min, m³/hora, galões/min). No caso de gases e vapores, a vazão instantânea pode ser expressa, em kg/h ou em m³/h. Quando se mede a vazão em unidades de volume, devem ser especificadas as "condições base" consideradas. Assim no caso de líquidos, é importante indicar que a vazão se considera "nas condições de operação", ou a 0°C, 20°C, ou em outra temperatura qualquer. Na medição de gases, é comum indicar a vazão em Nm³/h (metros cúbicos normais por hora, ou seja a temperatura de 0°C e a pressão atmosférica) ou em SCFM (pés cúbicos standard por minuto - temperatura 60°F e 14,696 PSia de pressão atmosférica). Vale dizer que:

| | | |
|---------------------|---|--------------------------|
| 1 m ³ | = | 1000 litros |
| 1 pé cúbico | = | 0,0283168 m ³ |
| 1 galão (americano) | = | 3,785 litros |
| 1 libra | = | 0,4536 kg |

5.2- MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO

Existem vários métodos para medirmos vazão. Entre os mais usados, destacamos:

5.2.1-Medição por pressão diferencial (Elementos deprimo-gênios)

- * Placa de orifício
- * Tubo Venturi
- * Tubo Pitot
- * Bocal
- * Tubo de Dall
- * Aerofólio
- * Orifício integral

5.2.2 -Medição por área variável

- * Rotâmetro

5.2.3 -Medição através de velocidade

- * Turbina

5.2.4 -Medição através de força

- * Placa de impacto (target meter)

5.2.5 - Medição por tensão induzida

- * Medidor magnético

5.2.6 -Medição em canais abertos

- * Calha Parshall
- * Vertedores

5.2.7 - Medição através de vórtices

- * Vortex

5.2.8 - Medição por efeito Coriolis

5.2.9 - Medição por ultra-som

- * Efeito Doppler
- * Por tempo de trânsito

5.2.10 - Medição por transferência de calor

- * Termal

5.2.11- Medição por deslocamento positivo

- * Disco nutante
- * Pistão oscilante
- * Medidor rotativo

5.3-MEDIÇÃO POR ELEMENTOS DEPRIMOGENÍOS

A pressão diferencial é produzida por vários tipos de elementos primários colocados na tubulação de forma tal que o fluido passe através deles. A sua função é aumentar a velocidade do fluido diminuindo a área de seção em um pequeno comprimento para haver uma queda de pressão. A vazão pode então ser medida a partir desta queda.

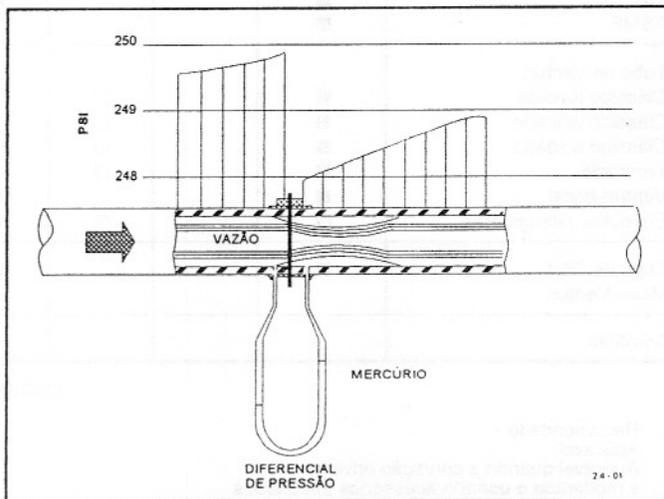


Fig. 1 - RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE E PRESSÃO DIFERENCIAL

Uma vantagem primordial dos medidores de vazão por ΔP , é que os mesmos podem ser aplicados numa grande variedade de medições, envolvendo a maioria dos gases e líquidos, inclusive fluidos com sólidos em suspensão,

bem como fluidos viscosos, em uma faixa de temperatura e pressão bastante ampla.

Um inconveniente deste tipo de medidor é a perda de carga que o mesmo causa ao processo, sendo a placa de orifício, o qual provoca a maior perda de carga "irrecuperável" (de 40 à 80% do ΔP gerado).

As tabelas à seguir mostram as características (dados comparativos) dos vários elementos deprimogênicos usados:

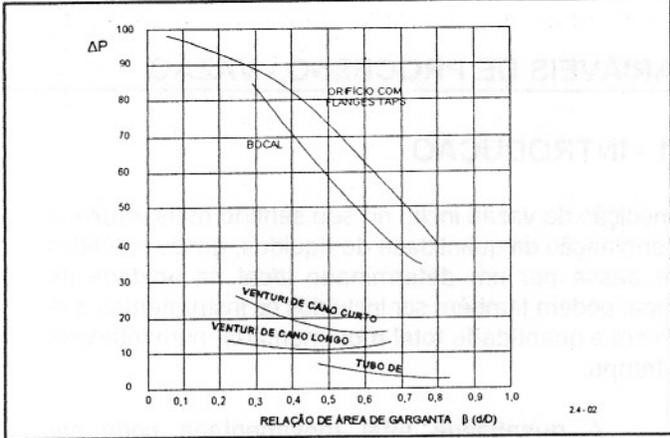


Fig. 2 - RELAÇÃO DOS MEDIDORES EM FUNÇÃO DO ΔP GERADO E COEFICIENTE β

| TIPO DE MEDIDOR DE VAZÃO | Líquidos limpos | Líquidos viscosos | Líquidos sujos | Gases / vapores | Líquidos corrosivos | Lodos ou polpas abrasivas | Temperaturas altas | Temperaturas criogênicas | Limite min. do nº de Reynolds |
|-------------------------------------|-----------------|-------------------|----------------|-----------------|---------------------|---------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 1- Elementos deprimogênicos | | | | | | | | | |
| - Placas de orifício concêntrico | | | | | | | | | |
| Flange taps | ■ | | □ | ■ | ■ | | ■ | ○ | > 8.000 |
| Corner taps | ■ | | | ■ | ■ | | ■ | ○ | > 5.000 |
| Radius taps | ■ | | □ | ■ | ■ | | ■ | ○ | > 8.000 |
| Vena contracta taps | ■ | | □ | ■ | ■ | | ■ | ○ | > 6.000 |
| Pipe taps | ■ | | □ | ■ | ■ | | ■ | ○ | > 14.000 |
| - Placas de orifício excêntrico | ○ | | ■ | ■ | ■ | | ■ | | > 10.000 |
| - Placas de orifício segmental | ○ | | ■ | ■ | ■ | | ■ | | > 10.000 |
| - Placas de orifício 1/4 círculo | ■ | ■ | □ | ○ | ■ | ○ | ■ | ○ | > 250 |
| - Placas de orifício entrada cônica | ■ | ■ | | ○ | ■ | | ■ | ○ | > 25 |
| - Bocal de Vazão | | | | | | | | | |
| ISA | ■ | | | ■ | ○ | ○ | ○ | | > 20 000 |
| ASME | ■ | | | ■ | ○ | ○ | ○ | | > 6 000 |
| - Tubo de Venturi | | | | | | | | | |
| Clássico fundido | ■ | | □ | ○ | ○ | ○ | ○ | | > 40.000 |
| Clássico usinado | ■ | | □ | ■ | ○ | ○ | ○ | ○ | > 50.000(d) |
| Clássico soldado | ■ | | □ | ■ | ○ | ○ | ○ | ○ | > 40.000 |
| Truncado | ■ | | □ | ■ | ○ | ○ | ○ | ○ | > 80.000 |
| Venturi-bocal | ■ | | | ■ | ○ | ○ | ○ | ○ | > 80.000 |
| Em dutos retangulares | ○ | | ○ | ■ | | ○ | ○ | | >200.000 |
| - Tubo de Pitot | ■ | | | ■ | ■ | | ○ | | > 2.000 |
| - Micro-Venturi | | | | ■ | ○ | | ○ | | > 10.000 |
| - Aerofólio | | | | ■ | | | ○ | | > 80.000 |

LEGENDA

- : Recomendado
- : Aplicável
- : Aplicável quando a condição adversa é moderada e usando acessórios adequados

d: O valor indicado se refere a R_d , e não R_D , como nos outros casos.

Tabela 1 - APLICAÇÃO DOS MEDIDORES DE VAZÃO

Observações:

- a) Na tabela acima, a 1ª coluna representa os grupos (tipos de medidores) que se baseiam em princípios de funcionamento semelhantes.
- b) Temperaturas altas/criogênicas e nº de Reynolds : as pressões e temperaturas podem corresponder as

- condições criogênicas ou as de vapores superaquecidos e o fluxo a se medir pode ser de um vaso sanguíneo ou um caudal de um rio, a cada caso corresponde um medidor adequado.
- c) O item PRECISÃO contido na próxima tabela, representa a tolerância de erro de medição (inclui erros

de conformidade, histerese e repetibilidade) para um determinado medidor. Ela pode ser expressa em % da escala inteira ou fundo de escala ou SPAN máx., denominado Padrão e em % do valor instantâneo, denominado Calibrado. Esta precisão(% do valor instantâneo) é melhor, porém quando o valor indicado for o valor máximo, a tolerância de erro (Precisão) é a mesma para ambos.

Exemplos:

c₁) Precisão em % da escala inteira (absoluta):

0 a 200 m³/h e ±1% f.e. (significa a tolerância de erro é de ± 2 m³/h em qualquer ponto da escala).

c₂) Precisão em % do valor instantâneo (relativa):

Para a mesma escala, indicação= 50 m³/h (± 0,5 m³/h).

d) Largura de Faixa ou Rangeabilidade: é a relação entre o valor máx. e o valor mín., lidos com a mesma precisão na escala de um instrumento.

Exemplo:

⇒ 0 a 200 m³/h ; precisão de ±1% do valor instantâneo e largura de 10:1. Significa que a precisão será respeitada entre os 20 m³/h e 200 m³/h.

| TIPO DE MEDIDOR DE VAZÃO | ESPECIFICAÇÕES BÁSICAS | | | | | INSTALAÇÃO | | | | | |
|----------------------------------|------------------------|----------|------------------|-----------|-----------|------------|-------|--------------------------|--------|-------------|----------|
| | Tamanho | | Largura de faixa | Precisão% | | Escala | Sinal | Facilidade de instalação | Filtro | Trecho reto | Posição |
| | Min (mm) | Max (mm) | | Padrão | Calibrado | | | | | | |
| 1- Elementos deprímogênicos | | | | | | | | | | | |
| - Placas de Orifício concêntrico | (1) | | (2) | | | | | | | | |
| - Flange taps | 60 | 760 | 3,6:1 | ± 1,5 | ± 0,75 | ✓ | Δ | Fácil | Não | Neces. | Qualquer |
| - Corner taps | 60 | 1.000 | 3,6:1 | ± 1,5 | ± 0,75 | ✓ | Δ | - | - | - | - |
| - Radius taps | 60 | 760 | 3,6:1 | ± 1,4 | ± 0,75 | ✓ | Δ | - | - | - | - |
| - Vena contracta taps | 60 | 760 | 3,6:1 | ± 1,4 | ± 0,75 | ✓ | Δ | - | - | - | - |
| - Pipe taps | 60 | 300 | 3,6:1 | ± 1,7 | ± 0,75 | ✓ | Δ | - | - | - | - |
| - Placas de orifício excêntrico | 100 | 350 | 3,6:1 | ± 2,1 | ± 0,75 | ✓ | Δ | Fácil | Não | Neces. | Qualquer |
| - Placas de orifício segmental | 100 | 350 | 3,6:1 | ± 2,2 | ± 0,75 | ✓ | Δ | - | - | - | - |
| - Placas de orifício 1/4 círculo | 26 | 760 | 3,6:1 | ± 2,2 | ± 0,75 | ✓ | Δ | - | - | - | - |
| - Placas de orifício entr.cônica | 26 | ? | 3,6:1 | ± 2,2 | ± 0,75 | ✓ | Δ | - | - | - | - |
| - Bocal de vazão | | | (2) | | | | | | | | |
| - ISA | 60 | 760 | 3,6:1 | ± 2,2 | ± 0,75 | ✓ | Δ | Fácil | Não | Neces. | Qualquer |
| - ASME | 60 | 200 | 3,6:1 | ± 2,2 | ± 0,75 | ✓ | Δ | - | - | - | - |
| - Tubo de Venturi | | | | | | | | | | | |
| - Clássico fundido | 100 | 800 | 3,6:1 | ± 1,7 | ± 0,75 | ✓ | Δ | Razoável | Não | Neces | Qualquer |
| - Clássico usinado | 60 | 250 | 3,6:1 | ± 1,7 | ± 0,75 | ✓ | Δ | Fácil | - | - | - |
| - Clássico soldado | 200 | 1.200 | 3,6:1 | ± 1,7 | ± 0,75 | ✓ | Δ | - | - | - | - |
| - Truncado | 200 | 1.200 | 3,6:1 | ± 1,7 | ± 0,75 | ✓ | Δ | - | - | - | - |
| - Venturi -bocal | 75 | 600 | 3,6:1 | ± 4,0 | ± 0,75 | ✓ | Δ | - | - | - | - |
| - Em dutos retangulares | | | 3,6:1 | ± 5,0 | ± 1,0 | ✓ | Δ | - | - | Pref. | - |
| - Tubo de Pitot | 200 | qualquer | 3,6:1 | ± 1,5 | ± 0,75 | ✓ | Δ | Muito Fácil | Não | Neces.(3) | Qualquer |
| - Micro-Venturi | 300 | qualquer | 3,6:1 | ± 3,0 | - | ✓ | Δ | - | - | Neces. | - |
| - Aerofólio | | | 3,6:1 | ± 5,0 | ± 1,0 | ✓ | Δ | Razoável/ Fácil | Não | Mínimo | Qualquer |

Tabela 2 - ESPECIFICAÇÕES BÁSICAS DE MEDIDORES DE VAZÃO

| TIPO DE MEDIDOR DE VAZÃO | CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS | | | PRINCIPAIS VANTAGENS | PRINCIPAIS INCONVENIENTES | | |
|-------------------------------------|--------------------------|----------------|----------------|---|--|------------------------------|--|
| | Manutenção | Preço Relativo | Perda de Carga | | | | |
| 1- Elementos deprímogênicos | | | | | | | |
| - Placas de orifício concêntrico | Verif. Periódica | Barato | Média | Facilidade de Fabricação, existência de dados para larga faixa de aplicação | Baixa largura de faixa, necessidade de elemento secundário | | |
| - Flange taps | - | - | - | | | | |
| - Corner taps | - | - | - | | | | |
| - Radius taps | - | - | - | | | | |
| - Vena contracta taps | - | - | - | | | | |
| - Pipe taps | - | - | - | | | | |
| - Placas de orifício excêntrico | Verif. periódica | Barato | Média | Largamente aceitos | Necessidade de longos trechos retos | | |
| - Placas de orifício segmental | - | - | - | | | | |
| - Placas de orifício 1/4 círculo | - | - | - | | | | |
| - Placas de orifício entrada cônica | - | - | - | | | | |
| - Bocal de vazão | Verif. periódica | Médio | Média | | | Aplicação a fluidos erosivos | Usinagem mais elaborada que a placa de orifício |
| - ISA | - | - | - | | | | |
| - ASME | - | - | - | | | | |
| - Tubo de Venturi | Verif. periódica | Médio + | Baixa | Baixa perda de carga | Custo de fabricação elevado | | |
| - Clássico fundido | - | - | - | | | | |
| - Clássico usinado | - | - | - | | | | |
| - Clássico soldado | - | - | - | | | | |
| - Truncado | - | - | - | | | | |
| - Venturi-bocal | - | - | - | Aplicação a fluidos erosivos | | | |
| - Em dutos retangulares | - | - | - | | | | |
| - Tubo de Pitot | Verif. periódica | Barato | Muito baixa | | | Facilidade de instalação | Baixa pressão operacional difícil de medir Precisão medíocre |
| - Micro-Venturi | - | - | - | | | | |
| - Aerofólio | Verif. periódica | Médio + | Muito baixa | | | | |

Tabela 3 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS MEDIDORES DE PRESSÃO

5.3.1 - CONCEITOS BÁSICOS

a) **Equação da Continuidade:** supondo um fluxo em regime permanente na tubulação da **fig. 3**, não podemos acumular massa no volume compreendido entre as seções 1 e 2, pois neste caso pelo menos a massa específica variaria, deixando de ser regime permanente.

Podemos dizer:

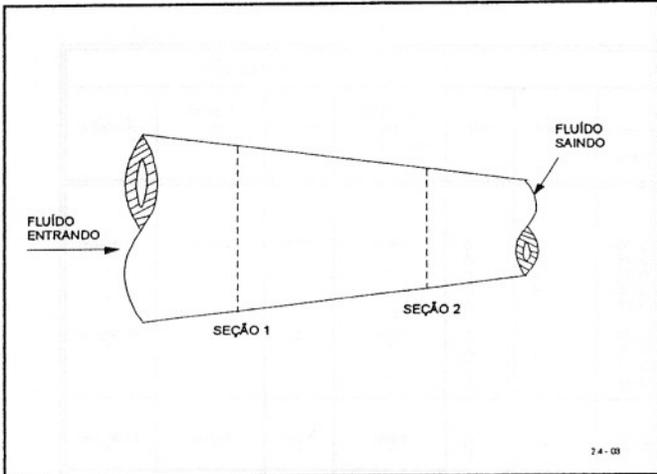


Fig. 3 - REPRESENTAÇÃO DO FLUXO

$$Q_{m1} = Q_{m2}$$

$$Q_m = Q \cdot \rho$$

$$Q = V \cdot S$$

$$Q_1 \cdot \rho_1 = Q_2 \cdot \rho_2 \quad \text{ou} \quad V_1 \cdot S_1 \cdot \rho_1 = V_2 \cdot S_2 \cdot \rho_2$$

Se o fluido for incompressível, teremos:

$$\rho_1 = \rho_2$$

$$V_1 \cdot S_1 = V_2 \cdot S_2 \quad \text{ou} \quad Q_1 = Q_2$$

Onde:

V_1 e V_2 = Velocidade nas seções 1 e 2

Q_m = Vazão em massa

ρ = Massa específica

S = Seção

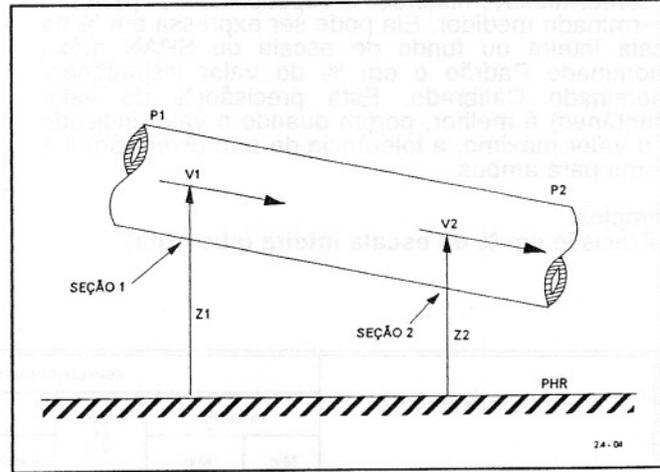


Fig. 4 - REPRESENTAÇÃO DE TEMPOS PARA A EQUAÇÃO DE BERNOULLI

b) **Equação de Bernoulli:** supondo um fluido perfeito (ideal), que não possui viscosidade, ele desloca-se sem atritos e portanto sem perdas de energia.

$$\sum E_{n1} = \sum E_{n2}$$

$$E_{ppo1} + E_{c1} = E_{ppr2} + E_{c2}$$

$$g \cdot Z_1 + \frac{P_1 \cdot W}{\gamma} + \frac{M \cdot (V_1)^2}{2} = M \cdot g Z_2 + \frac{P_2 \cdot W}{\gamma} + \frac{M \cdot (V_2)^2}{2}$$

Onde:

E_n = Energia total

E_{ppo} = Energia potencial de posição

E_{ppr} = Energia potencial de pressão

E_c = Energia cinética

M = Massa

W = Peso

g = Aceleração da gravidade

$P_1 P_2$ = Pressão nas seções 1 e 2

Como $W = M \cdot g$:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} \cdot W + \frac{(V_1)^2}{2g} \cdot W = W \cdot Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} \cdot W + \frac{(V_2)^2}{2g} \cdot W$$

Dividindo-se por W :

$$Z_1 + P_1 / \gamma + \frac{(V_1)^2}{2g} = Z_2 + P_2 / \gamma + \frac{(V_2)^2}{2g}$$

Considerando $Z_1 = Z_2$ (tubulação na horizontal)

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

c) Equação Básica para Elementos Deprimogênios

Baseado na equação de continuidade para fluido incompressível:

$$V_1 \cdot S_1 = V_2 \cdot S_2 \Rightarrow V_1 = V_2 \cdot S_2 / S_1$$

Fazendo:

$$\beta = d/D \Rightarrow \beta^2 = S_2 / S_1$$

Subst. na eq. de Bernoulli:

$$\frac{(V_2)^2 - (V_2 \cdot \beta^2)^2}{2 \cdot g} = \frac{P_1 - P_2}{\gamma}$$

Isolando:

$$V_2 : V_2 = \sqrt{P_1 - P_2} \cdot \sqrt{2g} \cdot 1/\sqrt{\gamma} \cdot 1/\sqrt{1 - \beta^4}$$

Fazendo:

$$= 1/\sqrt{1 - \beta^4} \Rightarrow V_2 = \sqrt{P_1 - P_2} \cdot \sqrt{2g} \cdot 1/\sqrt{\gamma} \cdot E$$

$$V_1 = \beta^2 \cdot \sqrt{P_1 - P_2} \cdot \sqrt{2g} \cdot 1/\sqrt{\gamma}$$

A equação acima é puramente teórica, principalmente pelo fato de considerar que, nas seções 1 e 2, as velocidades são uniformemente distribuídas e respectivamente iguais a V_1 e V_2 . Esta equação pode ser transformada adequadamente para uso prático, se incluímos um coeficiente de correção que leve em consideração todos elementos de um escoamento real. Este coeficiente, chama-se de **descarga C**:

$$C = \frac{\text{vazão real}}{\text{vazão teor}} \Rightarrow Q_{real} = Q_{teor} \cdot C$$

Os valores de C, são resultados experimentais e **para cada tipo de elemento deprimogênio e sistema de tomada de impulso**, C varia em função do diâmetro (D) da tubulação, do nº de Reynolds (R_e) e da relação dos diâmetros referentes a seção:

$$R_e = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

$$C = f(D \cdot R_e \cdot \beta)$$

- R_e = nº de Reynolds
- V = velocidade do fluido
- ν = viscosidade
- D = diâmetro da linha

$$R_{e \text{ crítico}} = 2300$$

Regime Laminar

$$\Rightarrow R_e < R_{e \text{ cr}}$$

Regime Turbulento

$$\Rightarrow R_e > R_{e \text{ cr}}$$

Portanto:

$$Q = S_1 \cdot V_1 \Rightarrow$$

$$Q = S_1 \cdot E \cdot C \cdot \beta^2 \cdot \sqrt{P_1 - P_2} \cdot \sqrt{2g} \cdot (1/\sqrt{\gamma})$$

d) Malha para Medição de Vazão: na indústria, o método mais utilizado para medir vazão pelo princípio da pressão diferencial variável é através da placa de orifício.

Podemos representar esquematicamente esta malha de medição, através do fluxograma mostrado na **fig. 5**.

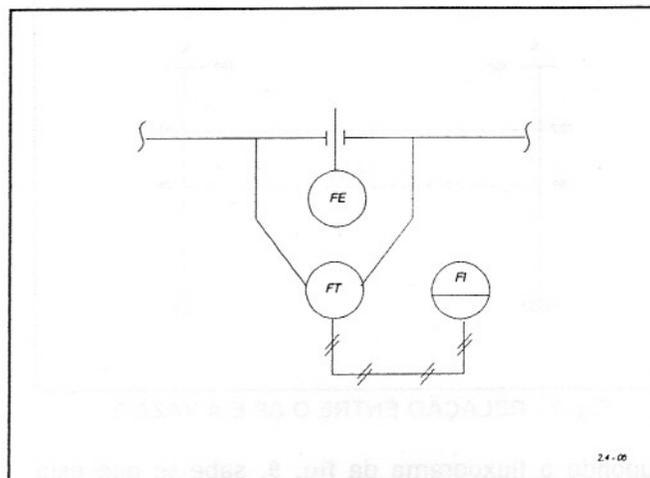


Fig. 5 - FLUXOGRAMA PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO

Da equação alcançada no item anterior pode-se concluir que a vazão só irá variar em função de $\sqrt{\Delta P}$, pois S_1 , E , C , β , $\sqrt{2g}$, $1/\sqrt{\gamma}$ são constantes. Portanto podemos simplificar a expressão, assim:

$$Q = K \times \sqrt{\Delta P}$$

Onde:

K = Constante que depende de fatores como:

- * Relação entre orifício e tubulação
- * Características do fluido

É importante observar, que o ΔP varia quadraticamente em função da vazão (Q).

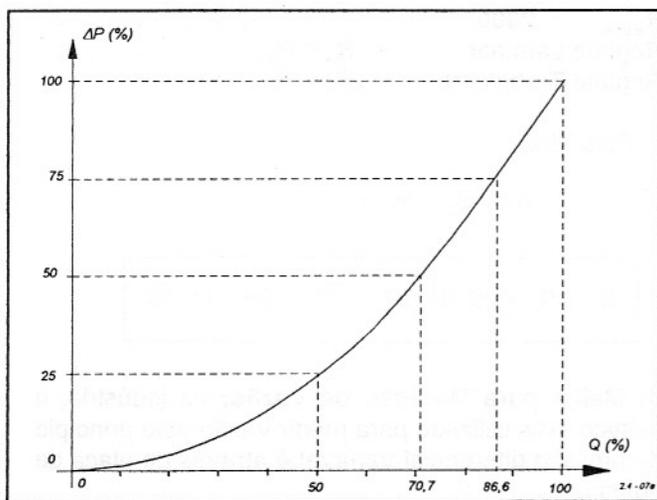


Fig. 6 - RELAÇÃO ENTRE ΔP E A VAZÃO

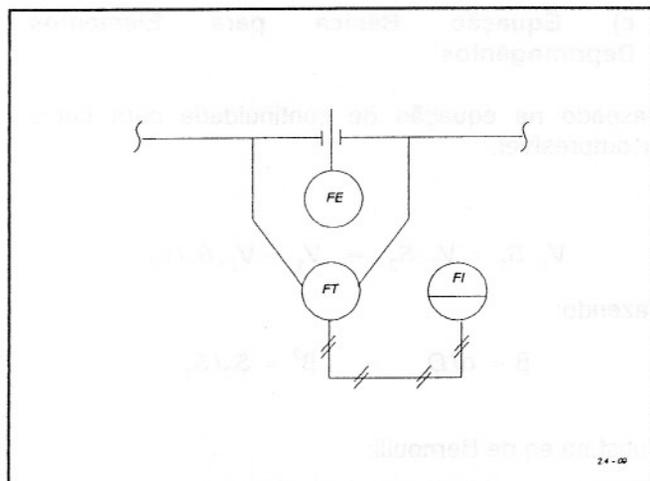


Fig. 9 - FLUXOGRAMA

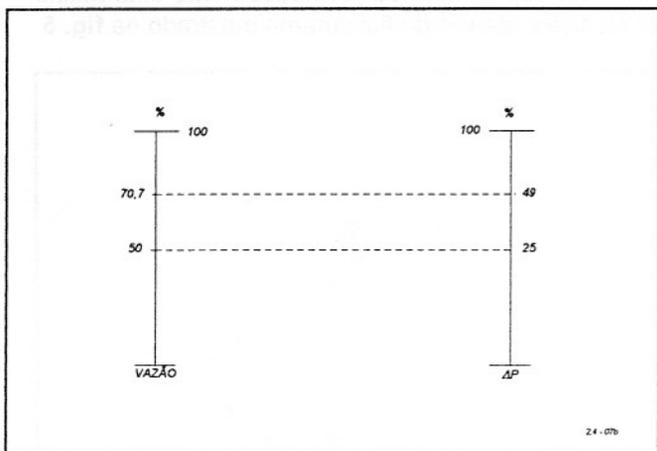


Fig. 7 - RELAÇÃO ENTRE O ΔP E A VAZÃO

Supondo o fluxograma da fig. 9, sabe-se que esta malha possui como características: Vazão máxima de 10 m³/H e o ΔP produzido com esta vazão é de 2500 mmH₂O. Como saber a pressão de saída do transmissor (FT), quanto a vazão for 8 m³/H?

Determinação do K:

$$Q = K \times \sqrt{\Delta P} \Rightarrow K = \frac{Q}{\sqrt{\Delta P}}$$

Para vazão máxima:

$$K = \frac{10}{\sqrt{2500}} = \frac{10}{50} \Rightarrow K = 0,200 \text{ (m}^3/\text{H, mmH}_2\text{O)}$$

Daí:

$$\Delta P \left[\frac{Q}{K} \right]^2 = \left[\frac{8}{0,2} \right]^2 = 1600 \Rightarrow \Delta P = 1600 \text{ mmH}_2\text{O}$$

Então

Pressão de saída de FT = P_{FT}

$$P_{FT} = \frac{\Delta P}{Span \Delta P} \times 12 + 3 = \frac{1600}{2500} \times 12 + 3$$

$$P_{FT} = 10,68 \text{ PSI}$$

E se o transmissor enviasse um sinal de 4 a 20 mA para o indicador teremos:

$$mA_{FT} = \frac{\Delta P}{Span \Delta P} \times 16 + 4 = \frac{1600}{2500} \times 16 + 4$$

$$mA_{FT} = 14,24 \text{ mA}$$

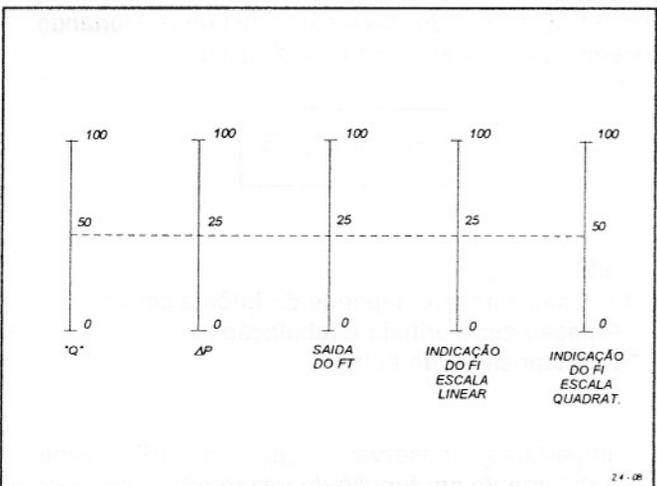


Fig. 8 - COMPARAÇÃO DOS SINAIS GERADOS NOS EQUIPAMENTOS

Outro método de trabalho, baseia-se no cálculo em porcentagem adotando-se K = 10.

8 m³/H equivale a 80% da vazão

Daí:

$$Q = K \times \sqrt{\Delta P} \Rightarrow \Delta P \left[\frac{Q}{K} \right]^2 = \left[\frac{80}{10} \right]^2 = 64$$

$$\Delta P = 64\%$$

$$P_{FT} = \left[\frac{\Delta P\%}{100} \times 12 \right] + 3 \Rightarrow P_{FT} = 0,64 \times 12 + 3$$

$$P_{FT} = 10,68 \text{ PSI}$$

Ou no caso de 4 a 20 mA:

$$= K \times \sqrt{\Delta P} \Rightarrow \Delta P \left[\frac{Q}{K} \right]^2 = \left[\frac{80}{10} \right]^2 = 64$$

$$\Delta P = 64\%$$

$$A_{FT} = \left[\frac{\Delta P\%}{100} \times 16 \right] + 4 \Rightarrow mA_{FT} = 0,64 \times 16 +$$

$$A_{FT} = 14,24 \text{ mA}$$

O sinal de saída de um transmissor de vazão por pressão diferencial variável, varia linearmente em função do ΔP e quadraticamente em função da vazão, portanto quando é acoplado um indicador para fazer a leitura de vazão vinda do transmissor, sua escala deve ser quadrática para termos leitura direta. Para linearizar o sinal de saída do transmissor em função de vazão, faz-se necessário o uso de um **EXTRATOR DE RAIZ QUADRADA**, conforme mostrado no fluxograma da fig. 10.

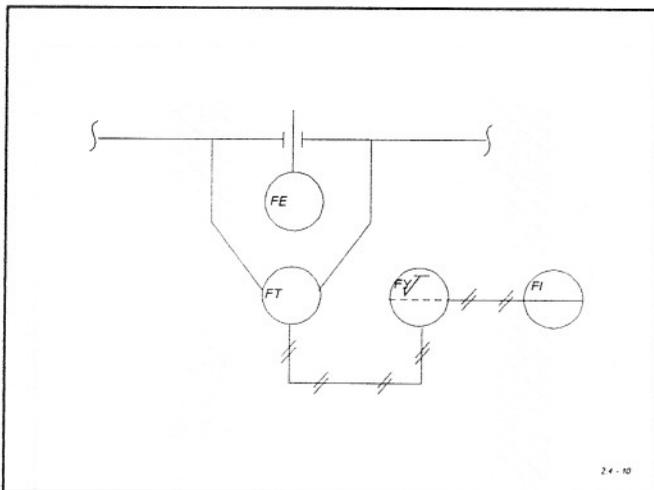
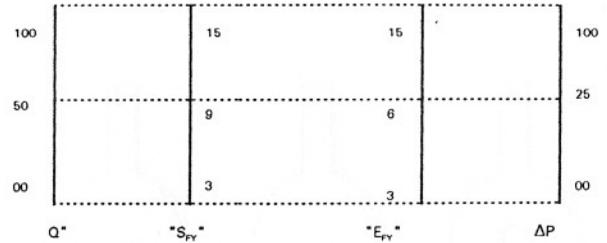


Fig. 10 - FLUXOGRAMA COM EXTRATOR DE RAIZ QUADRADA

A pressão de entrada no Extrator (E_{FY}), é linearmente proporcional ao ΔP e a pressão de saída do extrator (S_{FY}), é linearmente proporcional a vazão Q , então:



Daí:

$$S_{FY} = \left(\sqrt{\frac{E_{FY} - 3}{12}} \right) \cdot 12 + 3 \quad (PSI)$$

$$E_{FY} = [(S_{FY} - 3)/12]^2 \cdot 12 + 3 \quad (PSI)$$

Supondo que na entrada do extrator a pressão seja 10,68 PSI, qual a pressão na sua saída?

$$S_{FY} = \sqrt{\frac{10,68 - 3}{12}} \cdot 12 + 3 = 0,8 \cdot 12 + 3 = 12,6$$

$$S_{FY} = 12,6 \text{ PSI}$$

5.3.2 - PLACA DE ORIFÍCIO

Dos muitos dispositivos inseridos numa tubulação para se criar uma pressão diferencial, o mais simples e mais comumente empregado é o da placa de orifício.

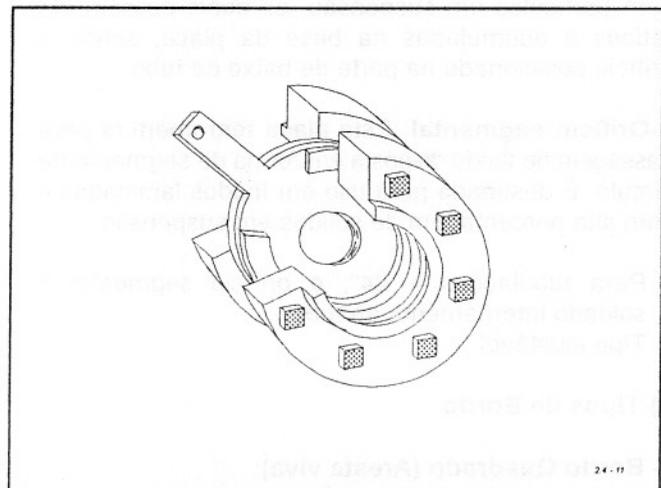


Fig. 11 - PLACA DE ORIFÍCIO INTALADA NA TUBULAÇÃO (EM CORTE)

Consiste em uma placa precisamente perfurada, a qual é instalada perpendicularmente ao eixo da tubulação.

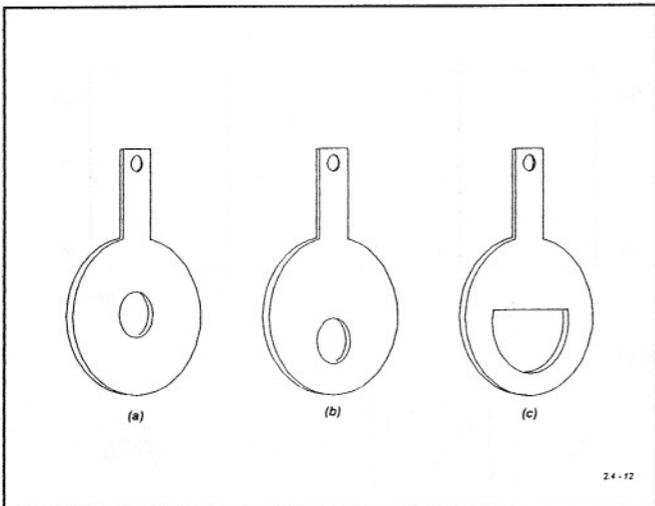


Fig. 12 - PLACAS DE ORIFÍCIOS CONCÊNTRICO E EXCÊNTRICO

É essencial que as bordas do orifício estejam sempre perfeitas, porque, se ficarem imprecisas ou corroídas pelo fluido, a precisão da medição será comprometida. Costumeiramente são fabricadas com aço inox, monel, latão, etc., dependendo do fluido.

Vantagens:

- Instalação fácil
- Econômica
- Construção simples
- Manutenção e troca simples

Desvantagens:

- Alta perda de carga

a) Tipos de Orifícios

1- Orifício concêntrico: Este tipo de placa é utilizado para líquidos, gases e vapor que não contenham sólidos em suspensão.

2-Orifício excêntrico: Utilizada quando tivermos fluido com partículas em suspensão, os quais possam ser retidos e acumulados na base da placa, sendo o orifício posicionado na parte de baixo do tubo.

3-Orifício segmental: Esta placa tem abertura para passagem de fluido disposta em forma de segmento de círculo. É destinada para uso em fluidos laminados e com alta porcentagem de sólidos em suspensão.

- * Para tubulações > 24", o orifício segmental é soldado internamente ao tubo.
- * Tipo ajustável

b) Tipos de Bordo

1- Bordo Quadrado (Aresta viva):

- * Usado em tubulações normalmente maiores que 6"
- * Não usada em fluxo com baixos N^os de R_D.

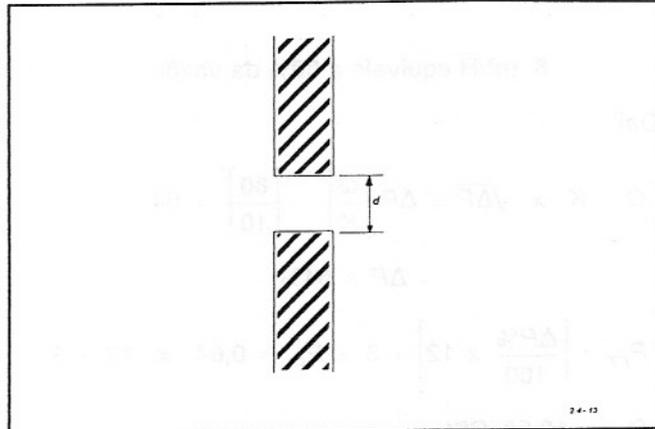


Fig. 13 - BORDO QUADRADO

2 - Bordo Arredondado (Quadrant edge ou quarto de círculo): Usado em fluidos altamente viscosos, onde o N^o de R_D inferior está em torno de 250.

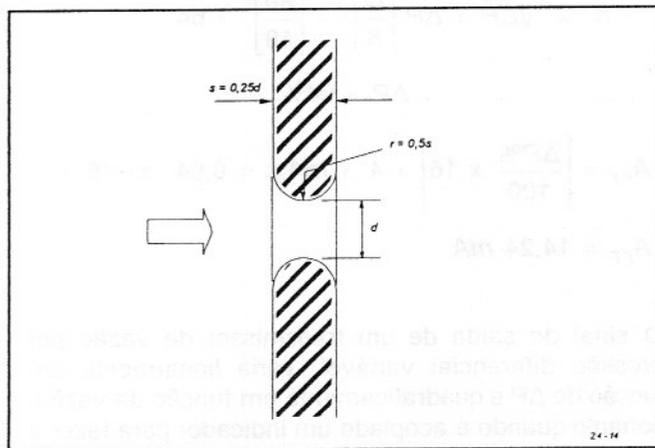


Fig. 14 - BORDO ARREDONDADO

3-Bordo com entrada cônica: Usado em aplicações, onde o N^o de R_D inferior é 25 e em condições severas de viscosidade.

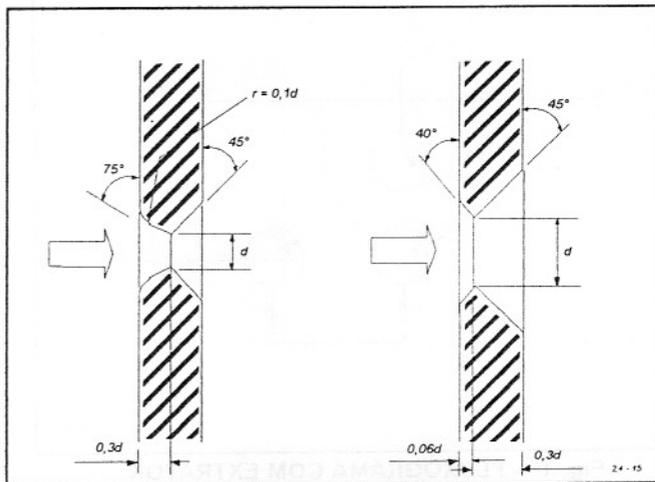


Fig. 15 - BORDO COM ENTRADA CÔNICA

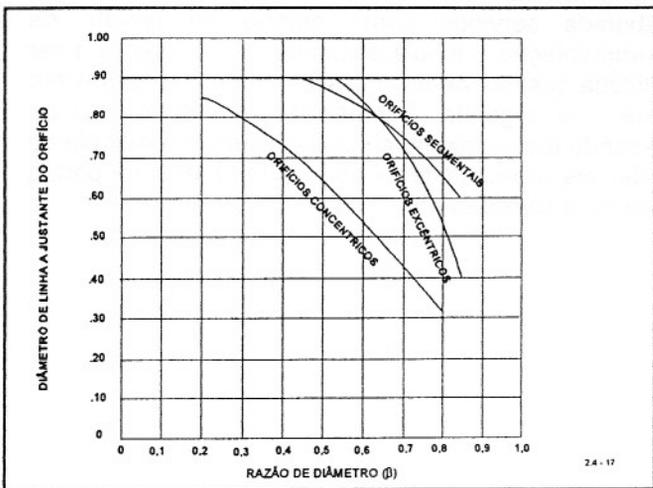


Fig. 18 - RELAÇÃO ENTRE O DIÂMETRO (d) E β

c) Tipos de Tomada de Impulso (Fig. 17)

- 1- **Tomadas em flange:** são as mais populares, onde furos das tomadas já são feitos no próprio flange.
- 2- **Tomadas na vena contracta:** utiliza flanges comuns, sendo o centro da tomada de alta pressão entre $1/2$ e $2D$ (em geral $1D$) e o centro da tomada de baixa estará no ponto de pressão mínima conforme figura a abaixo, dependendo do β .
- 3- **Tomada D e D/2:** usada em tubulações de 2" a 30" com Reynolds entre 8000 e 400000 para β entre 0,15 e 0,75.
- 4- **Tomadas em canto:** são construídas no próprio flange e seu uso principal é em tubulações menores que 2", tendo como desvantagem a grande possibilidade de entupimento

| DENOMINAÇÃO NA LITERATURA INGLESA | DENOMINAÇÃO SUGERIDA EM PORTUGUÊS | DISTÂNCIA DA TOMADA À FACE MONTANTE K 1 | DISTÂNCIA DA TOMADA À JUSANTE K 2 | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|---|-----------------------------------|--|
| FLANGE TAPS | TOMADA EM FLANGES | 1" | 1" (J) | |
| RADIUS TAPS | TOMADAS A D E 1/2 D | 1 D | 1/2 D (M) | |
| VENA CONTRACTA TAPS | TOMADAS EM VENA CONTRACTA | 1/2 D A 2 D | VER TABELA III.1b | |
| CORNER TAPS | TOMADAS EM CANTO | JUNTO | JUNTO | |
| PIPE TAPS | TOMADAS A 2 1/2 D E 8 D | 2 1/2 D | 8 D (M) | |

Fig. 17 - TIPOS DE TOMADAS DE IMPULSO

2.4 - 16

d) Trechos retos adotados em projetos

Nos projetos de instalações com placa de orifício envolvendo grande número de pontos de medição, é prática corrente estimar os comprimentos retos admitindo que todos os valores de β sejam iguais a 0,75.

Esta prática permite que se reservem os comprimentos necessários a instalação dos elementos primários, antes de se proceder ao cálculo, e permite também mudanças futuras da placa com condição de permanecer o valor de β inferior ou igual a 0,75.

Nestes casos, uma tabela simplificada pode ser elaborada servindo como critério de projeto de instrumentação e tubulação (figura 17A). A regra a ser aplicada quando vários acessórios estão montados em série é a seguinte: acrescentar ao trecho reto do acessório mais próximo à placa de orifício a metade do trecho reto correspondente ao acessório anterior, para o valor de β considerado.

| DISTÂNCIAS MÍNIMAS A MONTANTE E JUSANTE DE PLACAS E BOCAIS ($\beta = 0,75$) (em mm) | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------|----------------------------------|--------|---|---------------------|
| PLANO DA PLACA OU BOCAL DE VAZÃO | D | A ₁ Esq.① | A ₂ Esq.② | A ₃ Esq.③ | A ₄ Esq.④ | A ₅ Esq.⑤ | A ₆ Esq.⑥ | B | PLANO DA PLACA OU BOCAL DE VAZÃO | | | |
| | Nom. (Pol) | 17 D | 22 D | 28 D | 35 D | 13,5 D | 44 D | 4,5 D | | | | |
| | Um acessório (C < 6D) | 2 | 870 | 1 120 | 1 430 | 1 790 | 690 | 2 240 | | 230 | Duas curvas em planos diferentes Separadas p/ 10 D | |
| | | 3 | 1 290 | 1 672 | 2 130 | 2 660 | 1 030 | 3 340 | | 340 | | |
| | | 4 | 1 730 | 2 240 | 2 860 | 3 570 | 1 380 | 4 490 | | 460 | Duas curvas em planos diferentes Seguidas | |
| | | 6 | 2 580 | 3 340 | 4 260 | 5 320 | 2 050 | 6 690 | | 680 | | |
| | Curvas no mesmo plano | | 8 | 3 450 | 4 470 | 5 680 | 7 110 | 2 740 | | 8 930 | 910 | Redução ou expansão |
| | | | 10 | 4 320 | 5 588 | 7 110 | 8 890 | 3 430 | | 11 180 | 1 140 | |
| | | | 12 | 5 190 | 6 710 | 8 540 | 10 680 | 4 120 | | 13 420 | 1 370 | Válvula |
| | | | 14 | 6 050 | 7 830 | 9 970 | 12 460 | 4 810 | | 15 660 | 1 600 | |
| | | | 16 | 6 900 | 8 930 | 11 370 | 14 210 | 5 480 | | 17 860 | 1 830 | |
| | | 18 | 7 770 | 10 050 | 12 800 | 16 000 | 6 170 | 20 110 | 2 060 | | | |
| | | 20 | 8 640 | 11 180 | 14 220 | 17 780 | 6 860 | 22 350 | 2 290 | | | |
| | | 24 | 10 370 | 13 420 | 17 080 | 21 350 | 8 240 | 26 840 | 2 750 | | | |
| | 30 | 12 950 | 16 760 | 21 340 | 26 670 | 11 640 | 33 530 | 3 430 | | | | |

FIG. 19 - DISTÂNCIAS MÍNIMAS A MONTANTE E JUSANTE DE PLACA E BOCAIS

5.3.3 - TUBO VENTURI

O tubo Venturi, combina dentro de uma unidade simples, uma curta garganta estreitada entre duas seções cônicas e está usualmente instalado entre duas flanges, numa tubulação. Seu propósito é acelerar o fluido e temporariamente baixar sua pressão estática.

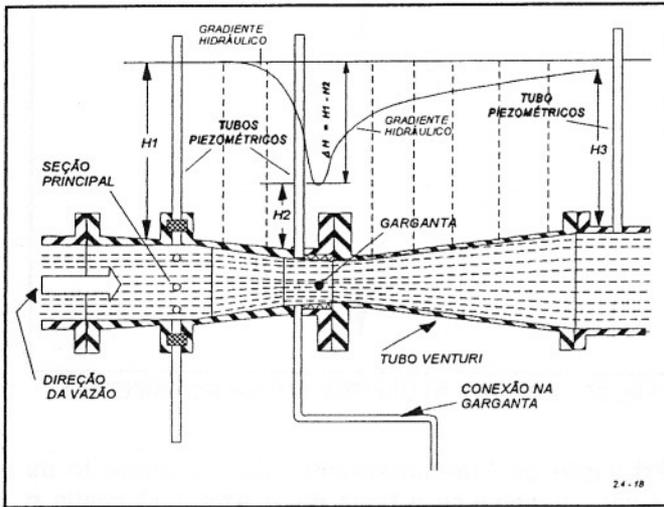


Fig.20 - RECUPERAÇÃO DE PRESSÃO NO TUBO DE VENTURI

A recuperação de pressão em um tubo Venturi é bastante eficiente, como podemos ver na figura ao lado, sendo seu uso recomendado quando se deseja um maior reestabelecimento de pressão e quando o fluido medido carrega sólidos em suspensão. O Venturi produz um diferencial menor que uma placa de orifício para uma mesma vazão e diâmetro igual a sua garganta.

A fig. 21 mostra os detalhes de construção de um dispositivo Venturi:

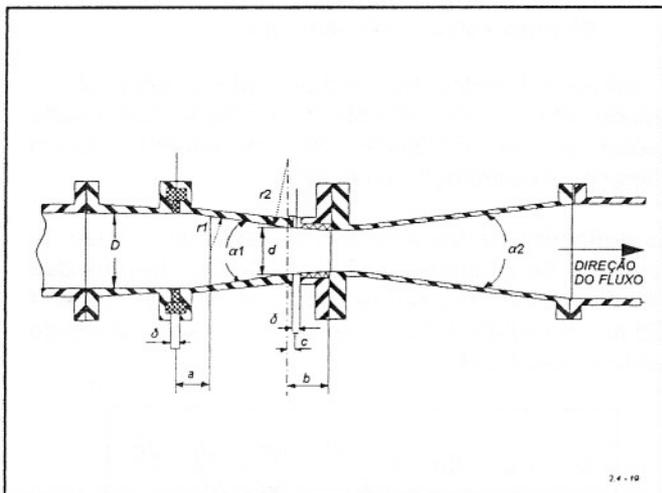


Fig. 21 - DIMENSÕES BÁSICAS DE UM TUBO DE VENTURI BÁSICO

Onde:

D = Diâmetro interno da tubulação

d = diâmetro da garganta

a = Localização da tomada de impluso de alta pressão

0,25D à 0,75D para 4" < D < 6"

0,25D à 0,50D para 6" < D < 32"

b = comprimento da garganta igual a "d"

c = Localização da tomada de baixa pressão = "d"/2

delta = Diâmetro interno da tomada de impluso

3/16 à 1/2"

r1 = 0 à 1,375D

r2 = 3,5 à 3,75D

alpha 1 = 21° +/- 2°

alpha 2 = 5° à 15°

Em lugar de ser um simples furo, a tomada de impluso, é formada por vários furos espaçados em torno do tubo. Eles são interligados por meio de um anel chamado anel piezométrico. Isto é destinado para obter-se a média das pressões em torno do ponto de medição.

5.3.4 - BOCAL

O Bocal de vazão (Flow nozzle) é, em muitos aspectos, um meio termo entre a placa de orifício e o tubo Venturi. O perfil dos bocais de vazão permite sua aplicação em serviços onde o fluido é abrasivo e corrosivo. O perfil de entrada é projetado de forma a guiar a veia fluida até atingir a seção mais estrangulada do elemento de medição, seguindo uma curva elíptica (projeto ASME) ou pseudoelíptica (projeto ISA). Seu principal uso é em medição de vapor com alta velocidade, recomendado p/tubulações > 50 mm.

TIPOS:

1-Bocal ISA 1932: Neste tipo de bocal as tomadas são do tipo em canto (corner taps). Possui as limitações de:

| | | | | |
|----------------|---|---------|---|--------|
| 0,32 | < | β | < | 0,8 |
| 50 mm | < | D | < | 500 mm |
| $2 \cdot 10^4$ | < | R_D | < | 10^7 |

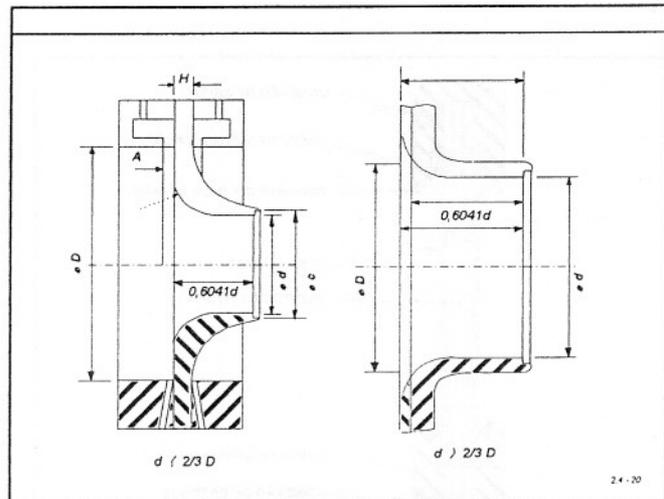


Fig. 22 - BOCAL DE VAZÃO (ISA 1932)

2- Bocal ASME

Neste bocal as tomadas são do tipo D e D/2 com as seguinte limitações:

| | | | | |
|--------|---|---------|---|--------|
| 0,2 | < | β | < | 0,8 |
| 50 mm | < | D | < | 400 mm |
| 10^4 | < | R_D | < | 10^7 |

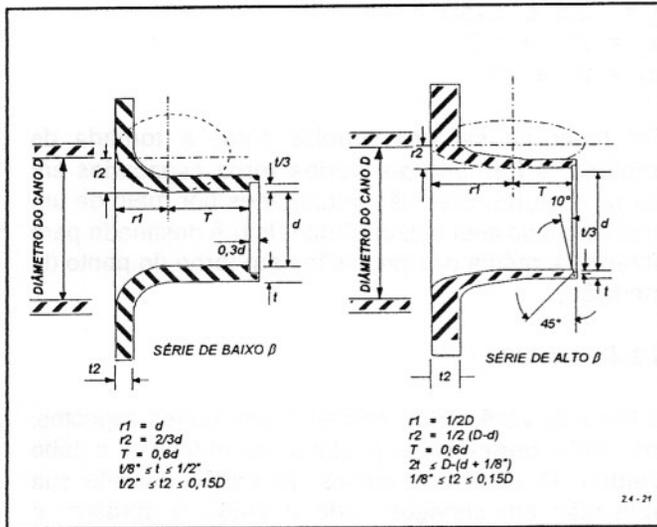


Fig. 2 - Bocal de Vazão (ASME)

5.4 - MEDIÇÃO DE VAZÃO POR ÁREA VARIÁVEL

Entre os medidores de vazão por área variável, o **Rotâmetro** é o mais utilizado. Outros medidores operam pelo mesmo princípio e possuem características comuns.

5.4.1 - Rotâmetro: É um dispositivo de medição direta de vazão utilizado em líquidos e gases. Possui escala aproximadamente linear, precisão em torno de 15% e não necessita de trecho reto em sua instalação, pois não sofre influência da turbulência do fluido.

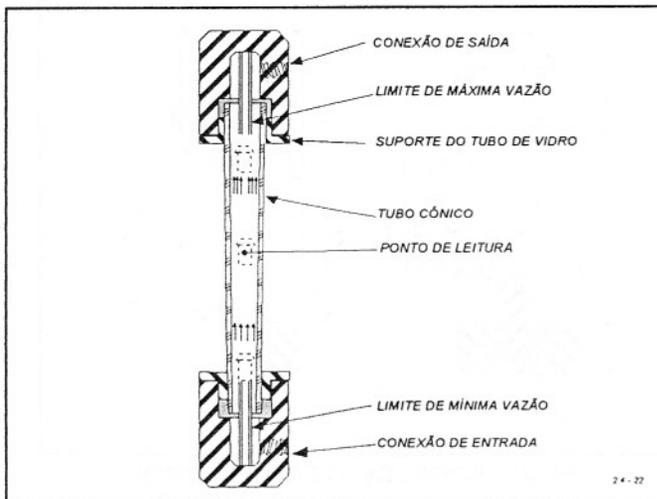


Fig. 24 - ROTÂMETRO

É constituído de um tubo cônico, geralmente de vidro,

contendo um flutuador que pode se mover livremente no sentido vertical. A posição do flutuador é indicada em uma escala graduada de acordo com a vazão.

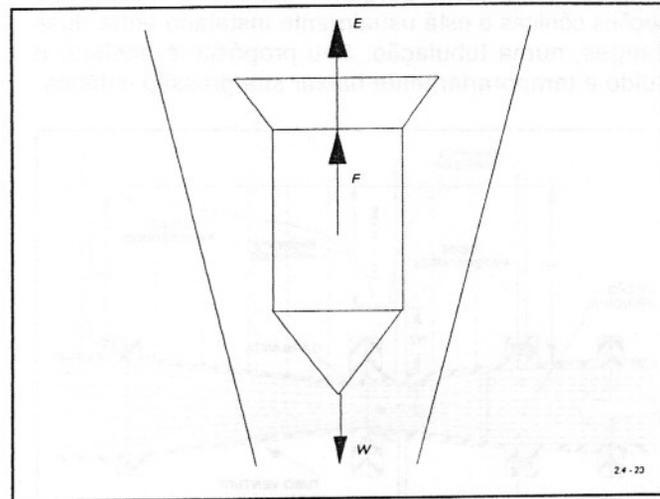


Fig. 25 - FORÇAS ATUANTES EM UM ROTÂMETRO

Princípio de Funcionamento: Com o aumento da Vazão, aumenta-se a força da arraste deslocando o flutuador para cima, fazendo aumentar a área de passagem do fluido, portanto com o aumento da área a diferença de pressão permanece constante. O equilíbrio dinâmico é atingido quando o peso do flutuador for igual a soma do empuxo e a força da arraste que é resultante da velocidade de escoamento.

Equilíbrio Dinâmico

$$W = F + E$$

Onde:

W = Peso do flutuador

F = Força de arraste (em função da velocidade)

E = Empuxo sofrido pelo flutuador

A escala do rotâmetro normalmente é gravada no próprio vidro ou externamente, podendo ser substituída dando as características do escoamento forem alteradas (recalibração da escala).

As equações de trabalho são obtidas partindo-se da condição de equilíbrio dinâmico onde os fatores que irão determinar a vazão máxima indicada no medidor são as dimensões do tubo cônico, as características do fluido e do flutuador.

$$Q = Aw \cdot Cd \cdot K \sqrt{\frac{Vf \cdot (\gamma_f - \gamma_l) \cdot 2g}{\gamma_l \cdot Af}}$$

Onde:

Q = Vazão máxima

Aw = Área de passagem do fluido

Cd = Coeficiente de descarga (depende da

- Aw = Área de passagem do fluido
 Cd = Coeficiente de descarga (depende da aerodinâmica do flutuador e do número de Reynolds)
 K = Constante de compatibilização de unidades
 Vf = Volume do flutuador
 γf = Peso específico do flutuador
 γl = Peso específico do fluido
 Af = área da secção de leitura do flutuador
 g = Aceleração da gravidade

Características de trabalho:

- Pode medir tanto vazões extremamente pequenas, como vazões muito altas.
- Tubos de vidro com paredes grossas podem suportar pressão de 30 Kgf/cm² e temperatura de 90°C.
- A forma do flutuador é escolhida em função do tipo de fluido e da viscosidade do mesmo.
- A queda de pressão provocada pelo rotâmetro é praticamente constante em todo o percurso do flutuador.

par de bobinas alimentadas por uma fonte de corrente alternada.

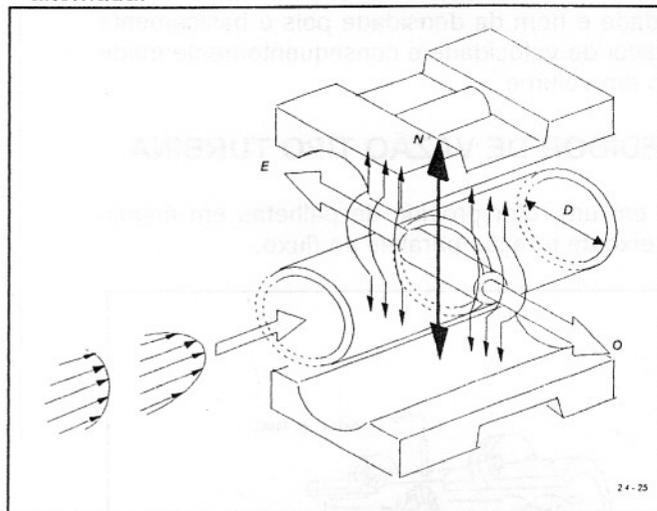


Fig. 26 - MEDIDOR MAGNÉTICO DE VAZÃO

Dois eletrodos são colocados nas paredes do medidor que é revestido por um material isolante (normalmente teflon). De acordo com a lei de Faraday, quando o fluido atravessar o medidor cortando as linhas do fluxo magnético, uma pequena tensão será induzida entre os eletrodos sendo proporcional ao movimento do fluido.

A milivoltagem gerada é amplificada e convertida em sinal analógico padronizado para instrumentação (4-20 ma).

A vazão portanto é expressão partindo-se da lei de Faraday:

$$V = \frac{E}{B \cdot L} \quad (2)$$

Sendo,

$$Q = V \cdot A \quad (3)$$

e substituindo (2) em (3), temos que:

$$Q = \frac{A \cdot E}{B \cdot L}$$

onde a Vazão (Q) é diretamente proporcional a tensão induzida.

5.5.3 -Principais aplicações dos medidores magnéticos

- Fluidos pastosos
- Fluidos viscosos
- Ácidos
- Lamas

A precisão deste tipo de medidor depende muito do

5.5 - MEDIDOR MAGNÉTICO DE VAZÃO

A lei Faraday estabelece que a tensão induzida através de qualquer condutor, ao mover-se perpendicularmente entre um campo magnético é proporcional a velocidade do condutor

Tentou aplicar sua teoria na medição da velocidade do rio Tamesis em 1832, supondo que a água circulava perpendicularmente ao campo magnético da terra e sendo a água um condutor relativamente bom. Mergulhou um par de eletrodos na água e esperava obter um sinal que variasse diretamente com a velocidade. Não obteve êxito pois não dispunha de medidores sensíveis e o campo magnético da terra é baixo.

Mas sua teoria foi aceita. Os holandeses foram os primeiros a utilizarem este princípio com o aparecimento dos amplificadores mais confiáveis e econômicos. A partir daí passou a utilizar-se em aplicações industriais.

5.5.1 - Teoria de Faraday

$$(1) \quad E = B \cdot L \cdot V$$

Onde:

- E = Tensão gerada por um condutor
- B = Densidade do campo magnético
- L = Distância dos eletrodos
- V = Velocidade do escoamento

5.5.2 - Princípios de Funcionamento do Medidor Magnético

O Campo magnético é provocado por um eletroímã, ou

circuito de medição e pode variar de 0,5% a 1,0% do valor máximo da vazão. Não sofre influência da viscosidade e nem da densidade pois é basicamente um medidor de velocidade e conseqüentemente mede a vazão em volume.

5.6 - MEDIDOR DE VAZÃO TIPO TURBINA

Consiste em um rotor provido de palhetas em ângulo com seu eixo de rotação paralelo ao fluxo.

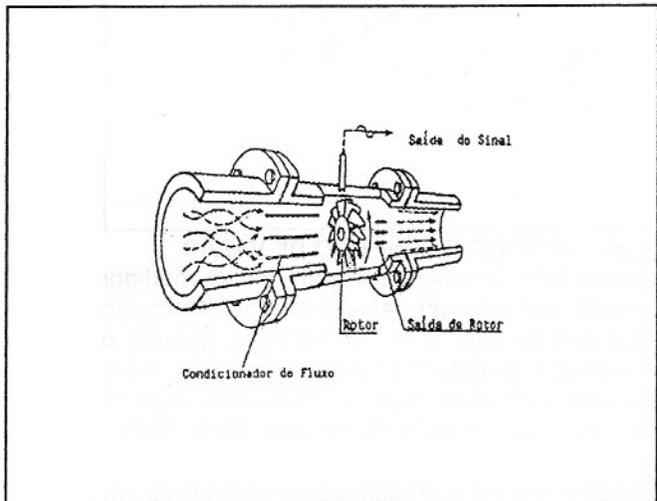


Fig. 27 - TURBINA

Uma bobina alimentada por uma fonte externa de energia produz um campo magnético e cada vez que uma palheta cruza o campo magnético gera um impulso devido a relutância do fluxo magnético.

O sinal de saída é uma seqüência de pulsos cuja frequência é proporcional a vazão. O sinal gerado pelas turbinas pode ser usado tanto para medição de vazão como para totalização.

5.7 - MEDIÇÃO DE VAZÃO EM CANAIS ABERTOS

A principal diferença de característica destes medidores em relação aqueles em tubulações industriais é que ao contrário dos mesmos, ficam parcialmente confinados e tem aplicação típica em sistemas de irrigação para agricultura, tratamento de água, redes de esgoto, etc.

Principais Medidores

5.7.1 - Vertedor: consiste basicamente em uma barragem colocada no canal, com uma abertura colocada na parte superior (em "V", retangular ou trapezoidal).

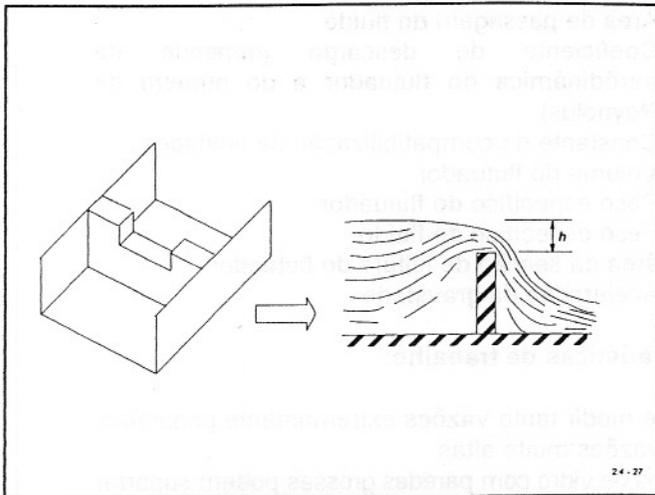


Fig. 28 - VERTEDOR RETANGULAR

Com o aumento da vazão, a leitura do líquido na entrada do vertedor também aumenta e desta forma pode-se deduzir a vazão através da equação matemática do tipo:

$$Q = 3,33 (L - 0,2H) \cdot H^{3/2}$$

Onde:

Q = Vazão
L = Largura do dique
H = Nível do lençol (altura)

A equação acima é específica para o vertedor com barragem retangular. A medição do nível (lençol), é feita através de bóia ou sistema de purga em câmara por vasos comunicantes para eliminar o efeito da turbulência do líquido.

5.7.2 - Calha Parshall: é semelhante a um tubo Venturi e consiste em uma canaleta com as paredes de entrada convergentes, paredes da garganta paralelas com base inclinada para baixo, e parede de saída divergente (com base inclinada para cima).

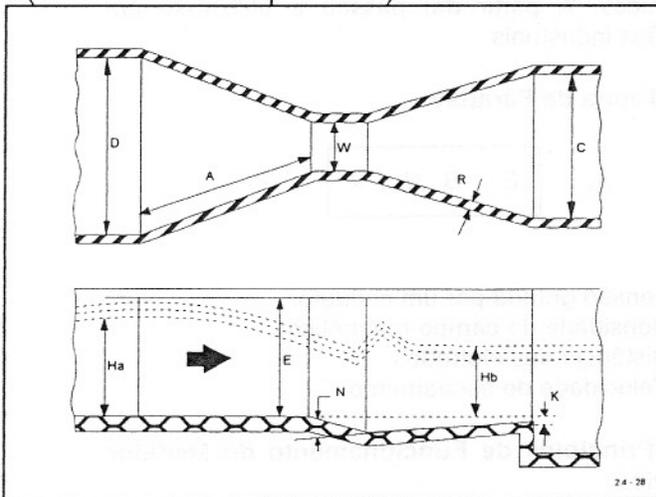


Fig. 29 - CALHA PARSHALL

Assim como nos vertedores a vazão é medida em função da altura do líquido só que nesse caso a tomada é feita na parte convergente da calha e expressa pela equação:

$$Q = K \cdot H^n$$

Onde:

Q = Vazão

K = Constante de proporcionalidade

H = Altura (nível)

n = Aproximadamente 1,5

Normalmente a calha Parshall é utilizada em situações onde não é possível utilizar os vertedores, como no caso de vazão de líquidos que contenham sólidos em suspensão.

Conhecendo-se a velocidade da correia e peso momentâneo do produto granulado, obtém a vazão em peso instantâneo.

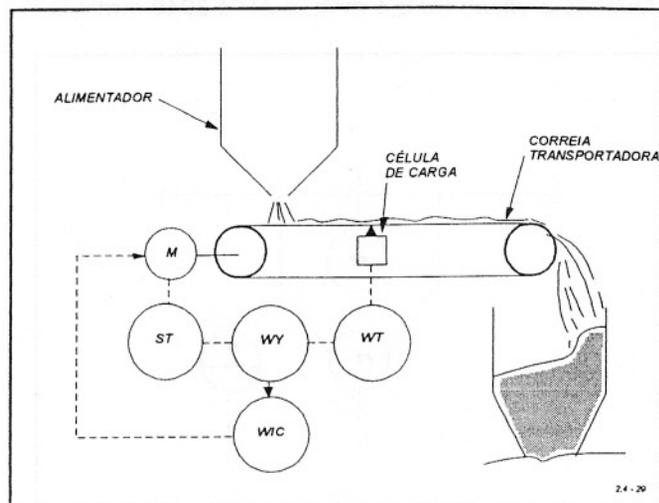


Fig. 30 - VAZÃO DE SÓLIDOS