

## 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, mm<sup>3</sup>, cm<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>, 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, m<sup>3</sup>/hora, galões/min). No caso de gases e vapores, a vazão instantânea pode ser expressa, em kg/h ou em m<sup>3</sup>/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 Nm<sup>3</sup>/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 <sup>3</sup>	=	1000 litros
1 pé cúbico	=	0,0283168 m <sup>3</sup>
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.

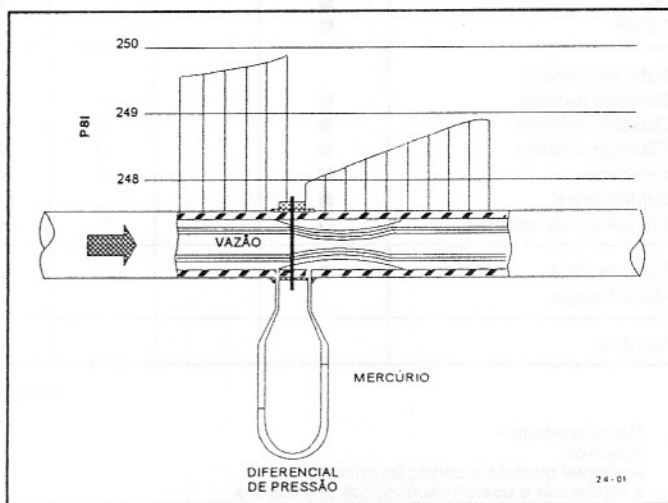


Fig. 1 - RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE E PRESSÃO DIFERENCIAL

Uma vantagem primordial dos medidores de vazão por  $\Delta P$ , 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  $\Delta P$  gerado).

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

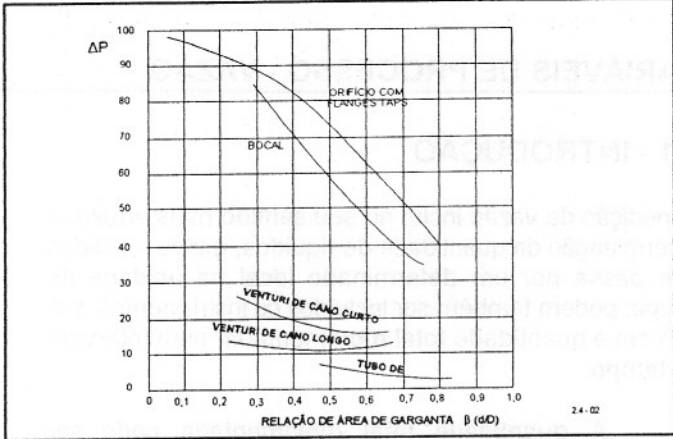


Fig. 2 - RELAÇÃO DOS MEDIDORES EM FUNÇÃO DO  $\Delta P$  GERADO E COEFICIENTE  $\beta$

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:

c<sub>1</sub>) Precisão em % da escala inteira (absoluta):

0 a 200 m<sup>3</sup>/h e ±1% f.e. (significa a tolerância de erro é de ± 2 m<sup>3</sup>/h em qualquer ponto da escala).

c<sub>2</sub>) Precisão em % do valor instantâneo (relativa):

Para a mesma escala, indicação= 50 m<sup>3</sup>/h (± 0,5 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/h ; precisão de ±1% do valor instantâneo e largura de 10:1. Significa que a precisão será respeitada entre os 20 m<sup>3</sup>/h e 200 m<sup>3</sup>/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	Baixa perda de carga Pouco trecho reto	Custo de fabricação elevado

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:

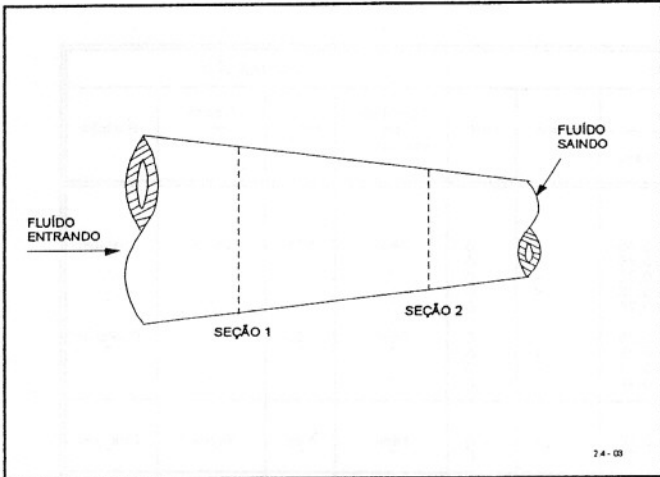


Fig. 3 - REPRESENTAÇÃO DO FLUXO

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

$$Q_m = Q \cdot \rho$$

$$Q = V \cdot S$$

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

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

$\rho$  = Massa específica

$S$  = Seção

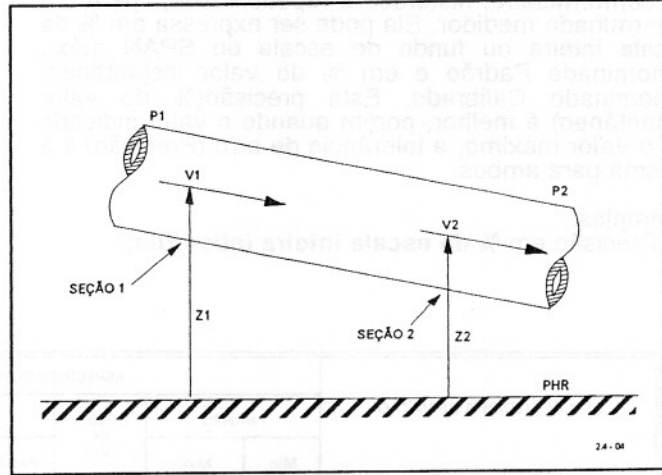


Fig. 4 - REPRESENTAÇÃO DE TEMPOS PARA A EQUAÇÃO DE BERNOULLI

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**:

$$C = \frac{\text{vazão real}}{\text{vazão teor}} =$$

$$Q_{real} = Q_{teor} \cdot C$$

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
- $\nu$  = 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:

$$Q = S_1 \cdot V_1 =$$

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

**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**.

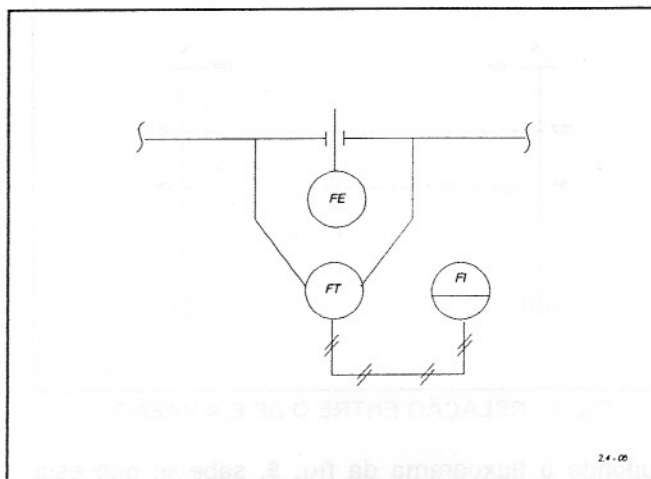


Fig. 5 - FLUXOGRAMA PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO

Da equação alcançada no item anterior pode-se concluir que a vazão só irá variar em função de  $\sqrt{\Delta P}$ , pois  $S_1$ ,  $E$ ,  $C$ ,  $\beta$ ,  $\sqrt{2g}$ ,  $1/\sqrt{\gamma}$  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  $\Delta P$  varia quadraticamente em função da vazão ( $Q$ ).

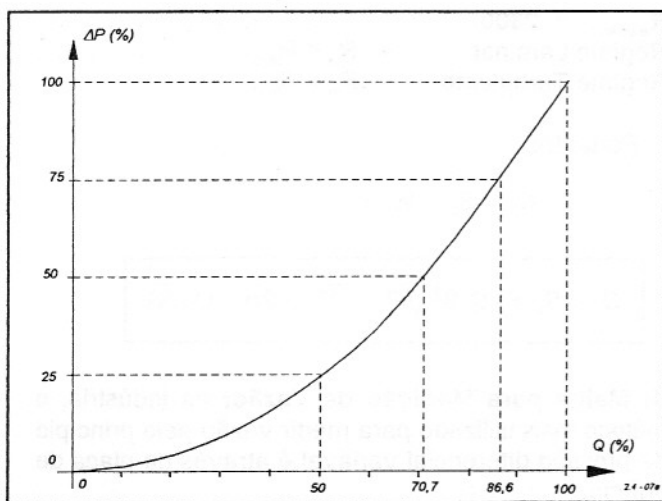


Fig. 6 - RELAÇÃO ENTRE  $\Delta P$  E A VAZÃO

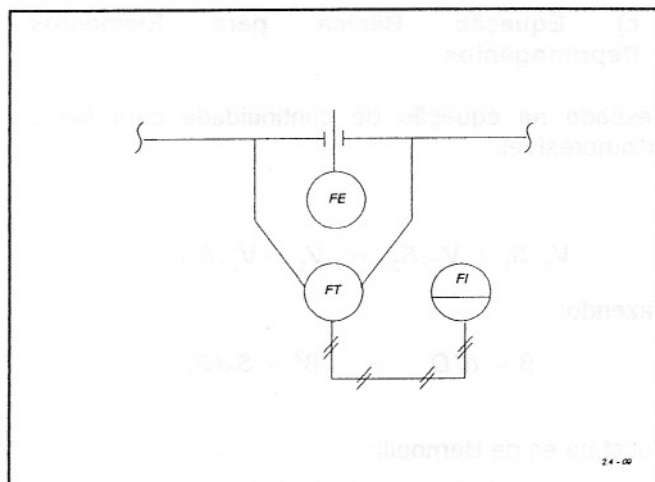


Fig. 9 - FLUXOGRAMA

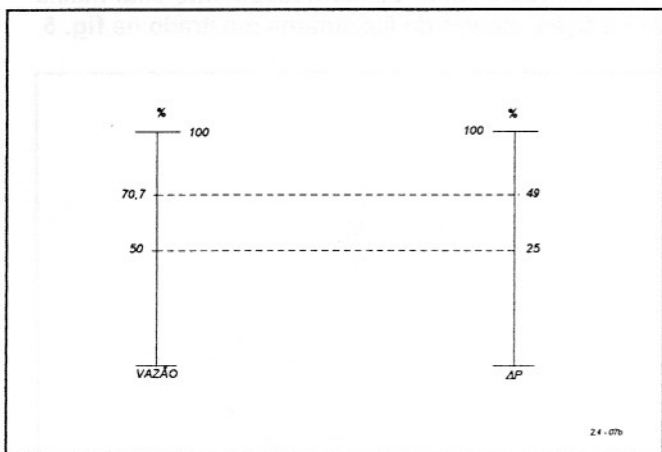


Fig. 7 - RELAÇÃO ENTRE O  $\Delta P$  E A VAZÃO

Supondo o fluxograma da **fig. 9**, sabe-se que esta malha possui como características: Vazão máxima de 10 m<sup>3</sup>/H e o  $\Delta P$  produzido com esta vazão é de 2500 mmH<sub>2</sub>O. Como saber a pressão de saída do transmissor (FT), quanto a vazão for 8 m<sup>3</sup>/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<sub>FT</sub>

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

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

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

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

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

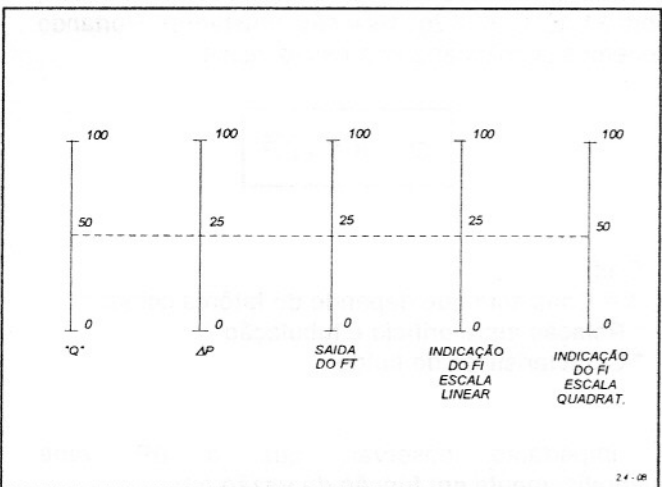


Fig. 8 - COMPARAÇÃO DOS SINAIS GERADOS NOS EQUIPAMENTOS

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

8 m<sup>3</sup>/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  $\Delta P$  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.

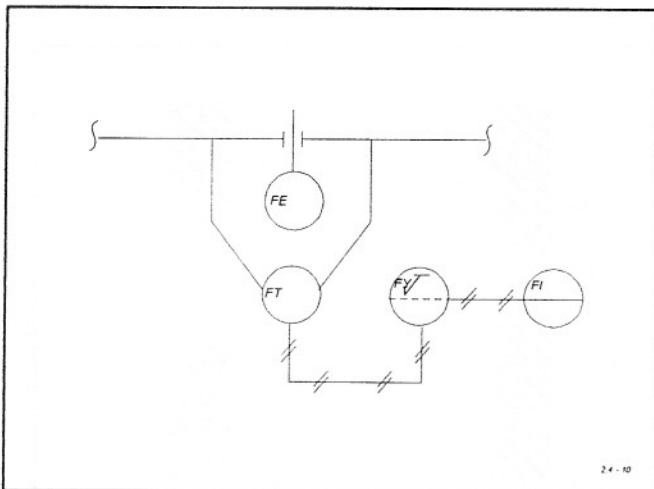
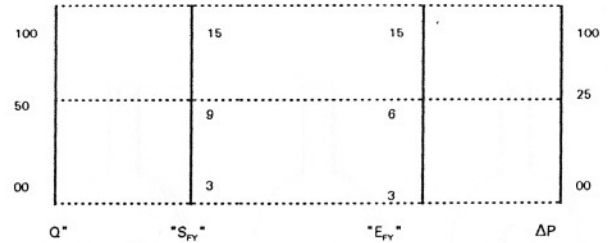


Fig. 10 - FLUXOGRAMA COM EXTRATOR DE RAIZ QUADRADA

A pressão de entrada no Extrator ( $E_{FY}$ ), é linearmente proporcional ao  $\Delta P$  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.

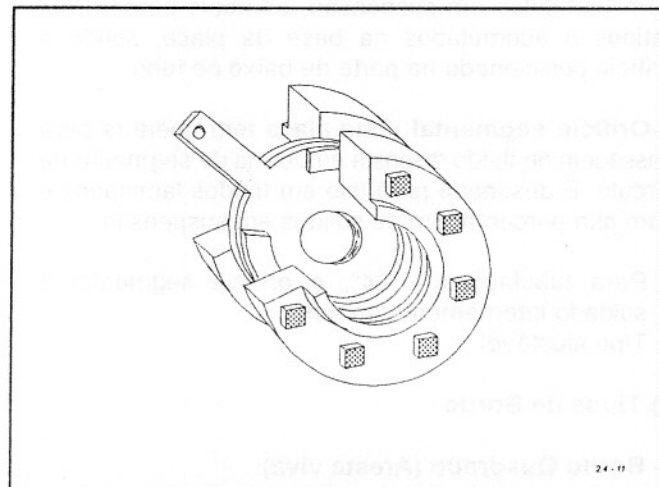


Fig. 11 - PLACA DE ORIFÍCIO INTALADA NA TUBULAÇÃO (EM CORTE)

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

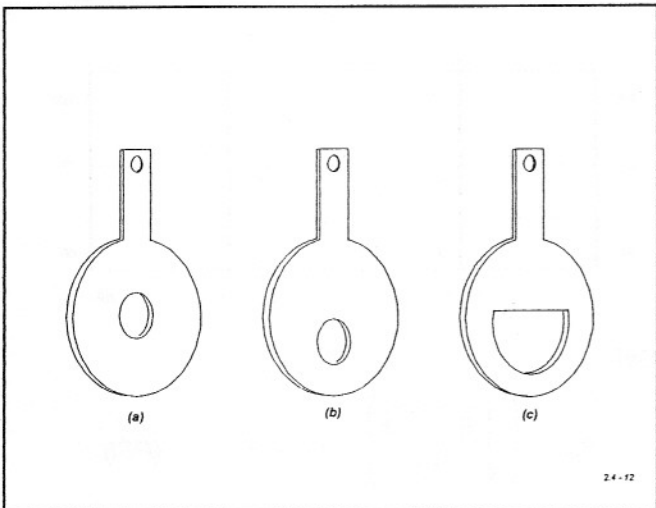


Fig. 12 - PLACAS DE ORIFÍCIOS CONCÊNTRICO E EXCÊNTRICO

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<sup>o</sup>s de R<sub>D</sub>.

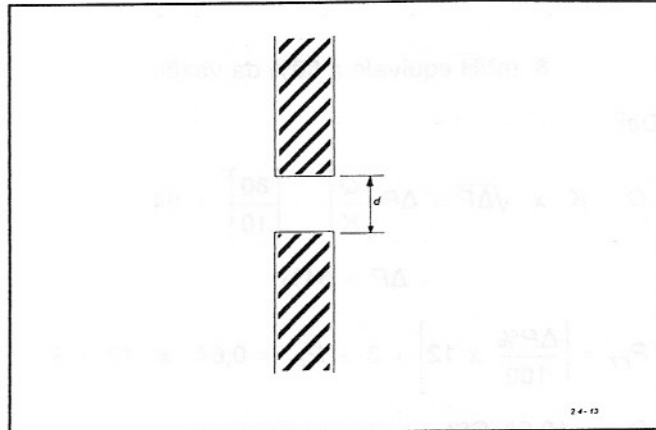


Fig. 13 - BORDO QUADRADO

**2 - Bordo Arredondado (Quadrant edge ou quarto de círculo):** Usado em fluidos altamente viscosos, onde o N<sup>o</sup> de R<sub>D</sub> inferior está em torno de 250.

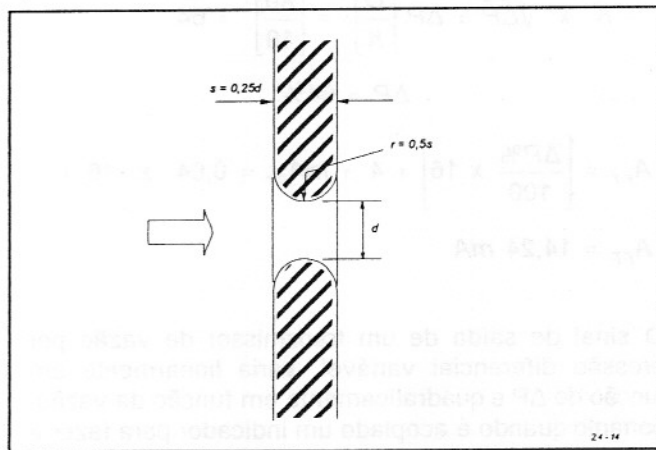


Fig. 14 - BORDO ARREDONDADO

**3-Bordo com entrada cônica:** Usado em aplicações, onde o N<sup>o</sup> de R<sub>D</sub> inferior é 25 e em condições severas de viscosidade.

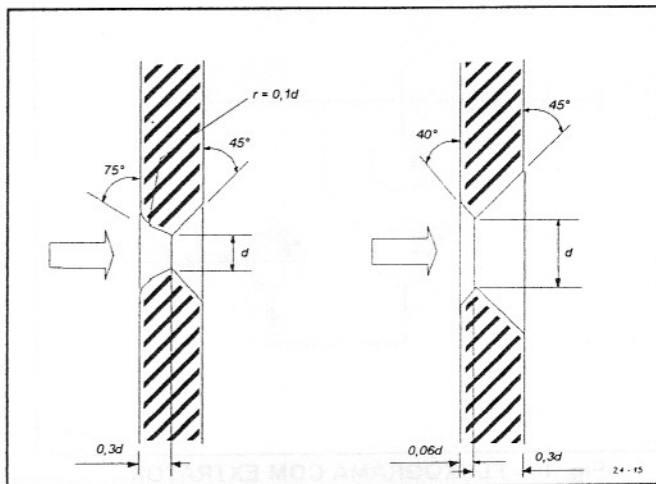


Fig. 15 - BORDO COM ENTRADA CÔNICA



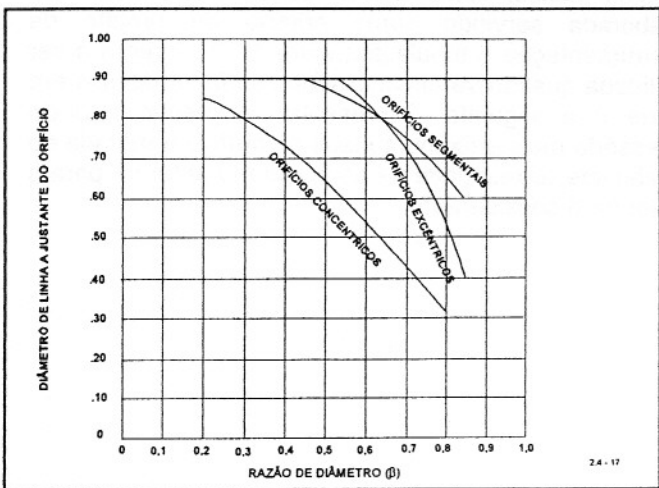


Fig. 18 - RELAÇÃO ENTRE O DIÂMETRO (d) E  $\beta$

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  $\beta$ .
- 3- **Tomada D e D/2:** usada em tubulações de 2" a 30" com Reynolds entre 8000 e 400000 para  $\beta$  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  $\beta$  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  $\beta$  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  $\beta$  considerado.

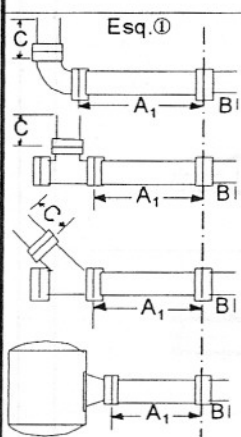
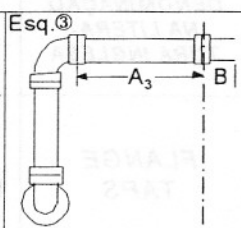
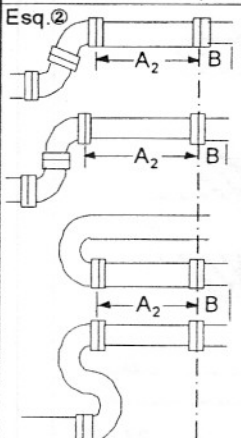
DISTÂNCIAS MÍNIMAS A MONTANTE E JUSANTE DE PLACAS E BOCAIS ( $\beta = 0,75$ ) (em mm)											
PLANO DA PLACA OU BOCAL DE VAZÃO	D	A <sub>1</sub> Esq.①	A <sub>2</sub> Esq.②	A <sub>3</sub> Esq.③	A <sub>4</sub> Esq.④	A <sub>5</sub> Esq.⑤	A <sub>6</sub> Esq.⑥	B	PLANO DA PLACA OU BOCAL DE VAZÃO		
	Nom. (Pol)	17 D	22 D	28 D	35 D	13,5 D	44 D	4,5 D			
	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			
	8	3 450	4 470	5 680	7 110	2 740	8 930	910		Redução ou expansão Seguidas	
	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	Redução ou expansão Seguidas
		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	Redução ou expansão Válvula
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	Válvula		
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.

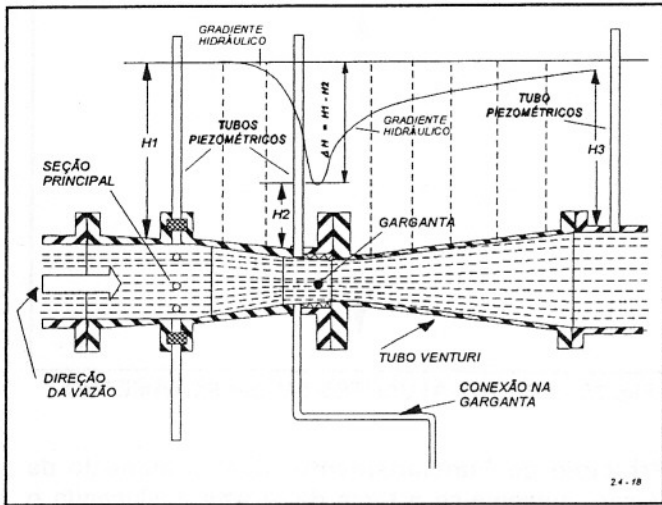


Fig.20 - RECUPERAÇÃO DE PRESSÃO NO TUBO DE VENTURI

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:

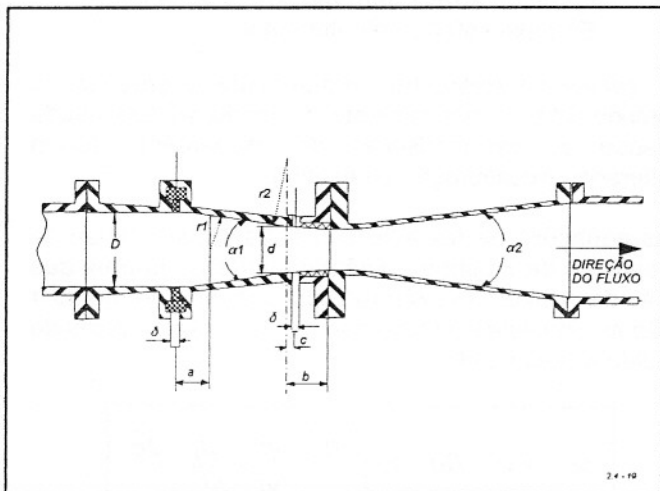


Fig. 21 - DIMENSÕES BÁSICAS DE UM TUBO DE VENTURI BÁSICO

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

δ = Diâmetro interno da tomada de impluso

3/16 à 1/2"

r<sub>1</sub> = 0 à 1,375D

r<sub>2</sub> = 3,5 à 3,75D

α<sub>1</sub> = 21° +/- 2°

α<sub>2</sub> = 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
2.10 <sup>4</sup>	<	R <sub>D</sub>	<	10 <sup>7</sup>

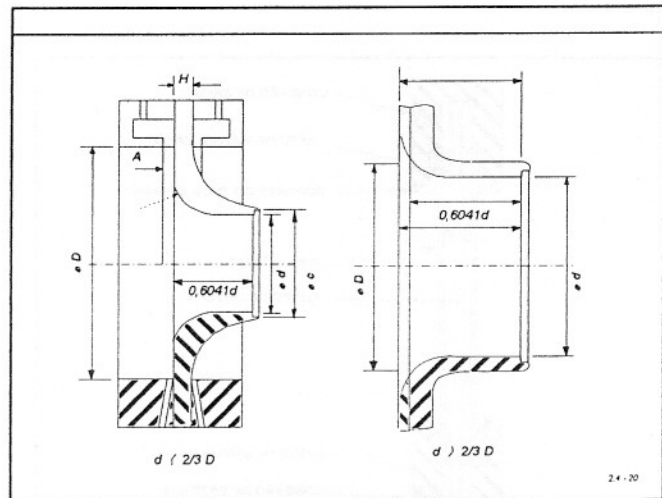


Fig. 22 - BOCAL DE VAZÃO (ISA 1932)

## 2- Bocal ASME

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

0,2	<	$\beta$	<	0,8
50 mm	<	D	<	400 mm
$10^4$	<	$R_D$	<	$10^7$

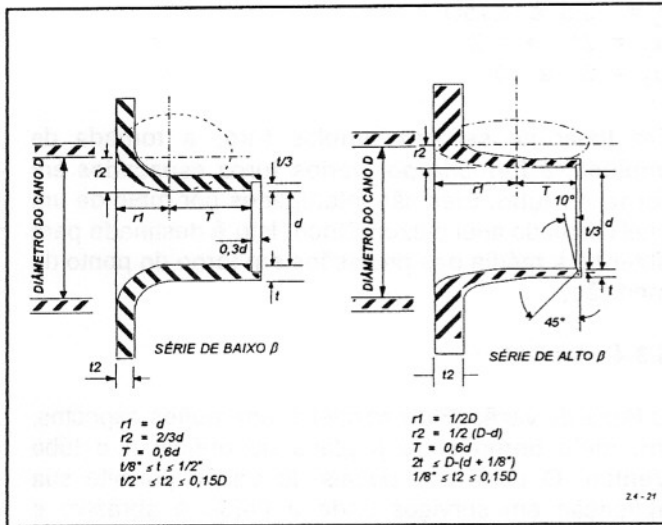


Fig. 2 - BOCAL DE VAZÃO (ASME)

## 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.

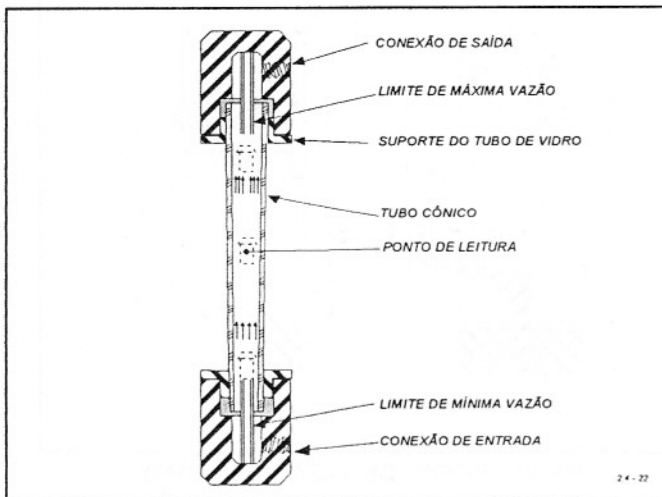


Fig. 24 - ROTÂMETRO

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.

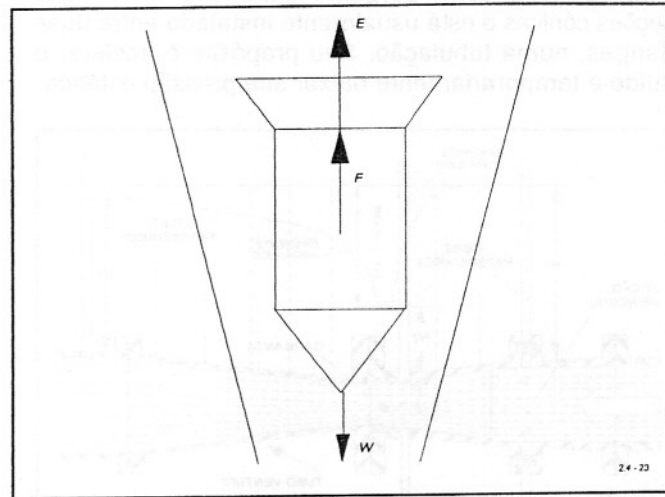


Fig. 25 - FORÇAS ATUANTES EM UM ROTÂMETRO

**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.

$$Q = A_w \cdot C_d \cdot K \sqrt{\frac{V_f \cdot (\gamma_f - \gamma_l) \cdot 2g}{\gamma_l \cdot A_f}}$$

Onde:

Q = Vazão máxima

$A_w$  = Área de passagem do fluido

$C_d$  = 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/cm<sup>2</sup> 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.

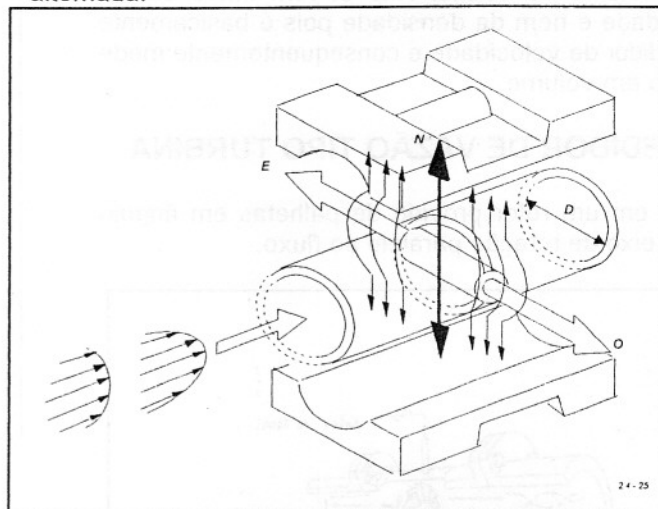


Fig. 26 - MEDIDOR MAGNÉTICO DE VAZÃO

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 consequentemente 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.

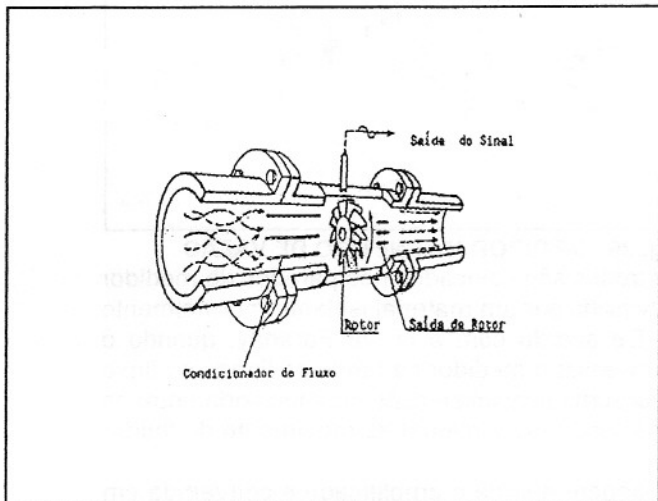


Fig. 27 - TURBINA

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 sequência 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).

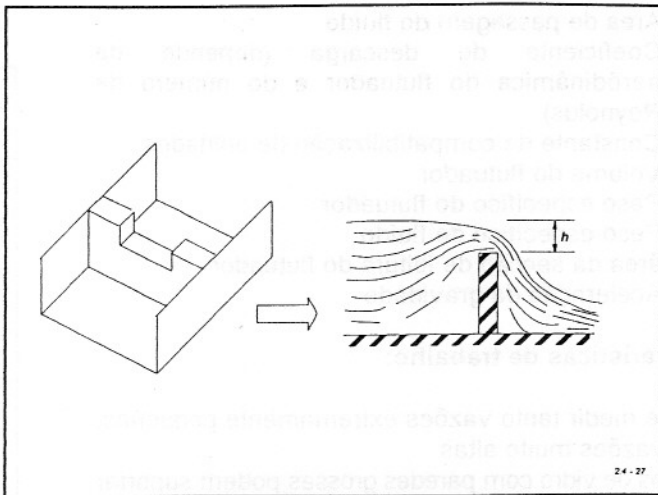


Fig. 28 - VERTEDOR RETANGULAR

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).

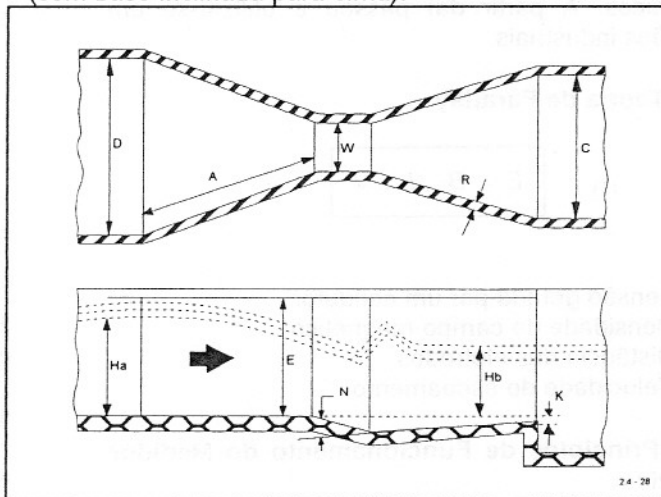


Fig. 29 - CALHA PARSHALL

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.

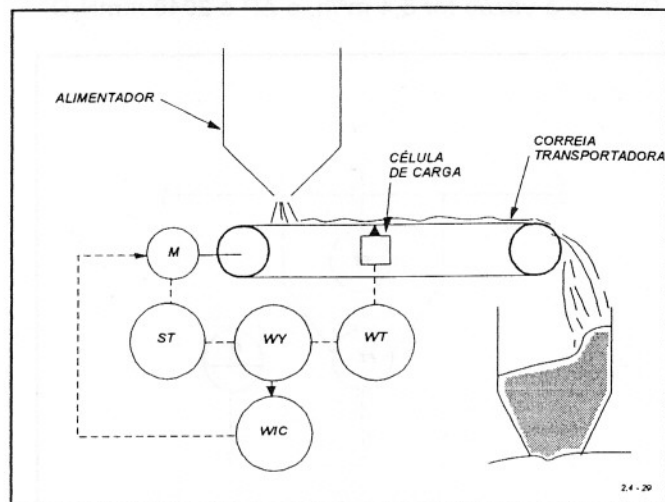


Fig. 30 - VAZÃO DE SÓLIDOS