

PTC3421 – Instrumentação Industrial

# Vazão – Parte III

---

V2020A

PROF. R. P. MARQUES

# Sensores

MECÂNICOS	Pistões	Vazão volumétrica
	Engrenagens	Vazão volumétrica
	Rotâmetros	Vazão volumétrica
	Turbinas	Vazão volumétrica
	Disco de natação	Vazão volumétrica
	Vórtice	Vazão volumétrica
PRESSÃO	<b>Placas de orifício</b>	<b>Vazão volumétrica</b>
	<b>Bocais de vazão</b>	<b>Vazão volumétrica</b>
	<b>Venturis</b>	<b>Vazão volumétrica</b>
	<b>Tubos de Pitot</b>	<b>Vazão volumétrica</b>
	<b>Medidores centrífugos</b>	<b>Vazão volumétrica</b>
EFEITO CORIOLIS		Vazão mássica
ELETROMAGNÉTICOS		Vazão volumétrica
TÉRMICOS		Vazão mássica
ULTRASSOM (efeito Doppler, tempo de viagem)		Vazão volumétrica

# Introdução

---

Sensores DEPRIMOGÊNIOS medem vazão a partir de diferenças de pressão provocadas por uma perturbação conhecida provocada no fluxo do fluido, usualmente por um estreitamento da tubulação.

São sensores tradicionais em uso industrial e ainda hoje são os mais utilizados, pois se prestam às mais diversas condições de vazão (líquidos ou gases, diferentes viscosidades, vazões elevadas, etc.) com custos bastante razoáveis.

Em geral os dispositivos que perturbam o fluxo não possuem partes móveis e portanto são bastante robustos, porém sensores de pressão são necessários para estimar a vazão.

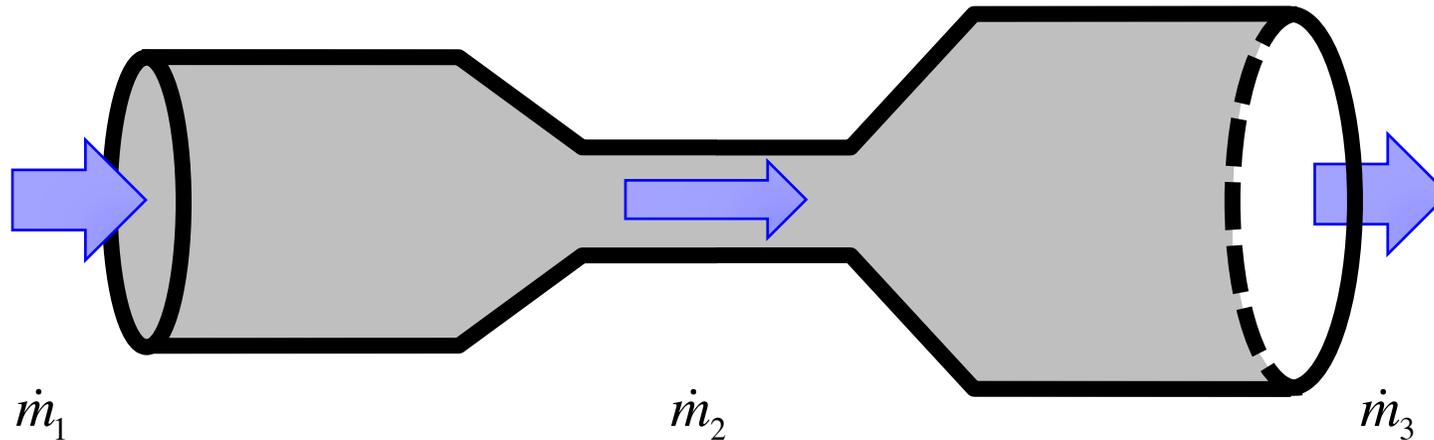
A qualidade da medida depende de uma série de fatores (regularização do fluxo a jusante, propriedades do fluido, rugosidade da tubulação, etc.), de modo que atingir uma boa precisão é complicado.

Uma desvantagem desse tipo de medida é que os próprios sensores perturbam significativamente o fluxo e provocam perda de carga.

# Fundamentos

## EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

Suponha um fluido passando por uma tubulação que possui um estreitamento em regime permanente (i.e. não há acúmulo de massa na tubulação).



$\dot{m}_i$  representa a vazão mássica e  $Q_i$  representa a vazão volumétrica.

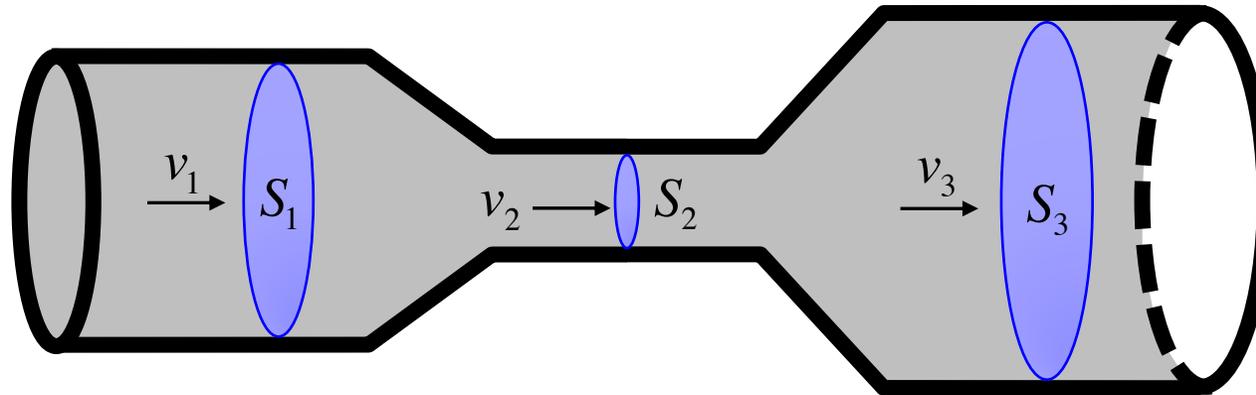
Para um fluido incompressível:  $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \Rightarrow Q_1 = Q_2 = Q_3$

Para um fluido compressível:  $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \Rightarrow \rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 = \rho_3 Q_3$

# Fundamentos

## EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

$S_i$  representa a Seção Transversal e  $v_i$  é a velocidade média do fluido.



Temos

Para um fluido incompressível:  $v_1 S_1 = v_2 S_2 = v_3 S_3$

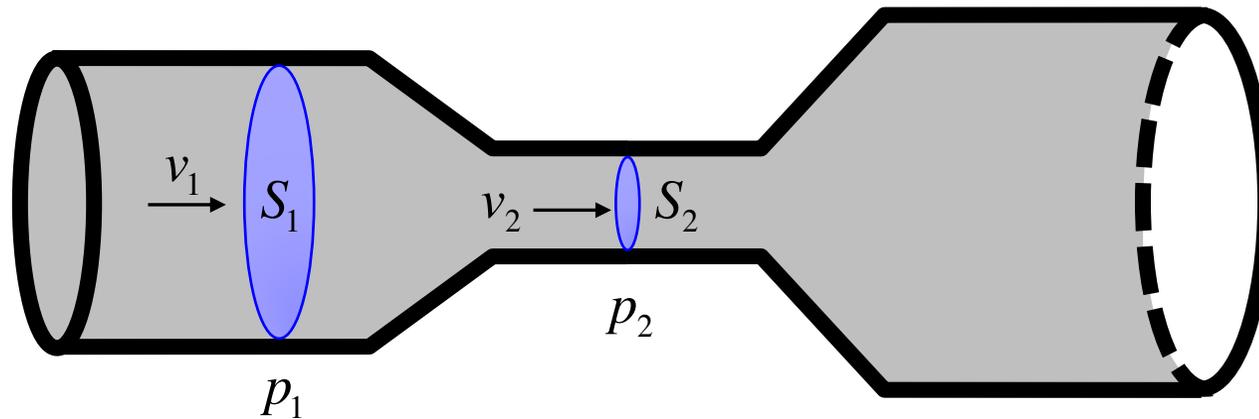
Para um fluido compressível:  $\rho_1 v_1 S_1 = \rho_2 v_2 S_2 = \rho_3 v_3 S_3$

(ou seja, quando há um estreitamento, a velocidade do fluido aumenta)

# Fundamentos

## EQUAÇÃO DE BERNOULLI (1738)

Pode-se mostrar que, para um fluido perfeito (incompressível, sem viscosidade, sem turbulência) em uma tubulação horizontal:



$$Q = S_1 \beta^2 \sqrt{\frac{1}{1 - \beta^4} \cdot \rho (p_1 - p_2) \cdot 2g} \quad \text{com} \quad \beta = \frac{S_2}{S_1}$$

# Fundamentos

---

A equação de Bernoulli é simplista demais para ser diretamente aplicada em situações reais.

No entanto, a equação de Bernoulli serve como base para aproximações que permitem estimar a vazão a partir da diferença de pressões em estreitamentos diversos. Na prática usa-se a equação associada a uma série de termos de correção empíricos.

Via de regra, esta relação é expressa entre vazão e raiz quadrada da pressão diferencial e depende dos diâmetros da tubulação e de parâmetros do fluido.

A norma ISO 5167 partes 1-5 (No Brasil ABNT/NBR/ISO 5167) apresenta diversas diretrizes para dimensionamento e especificação de estreitamentos e sensores.

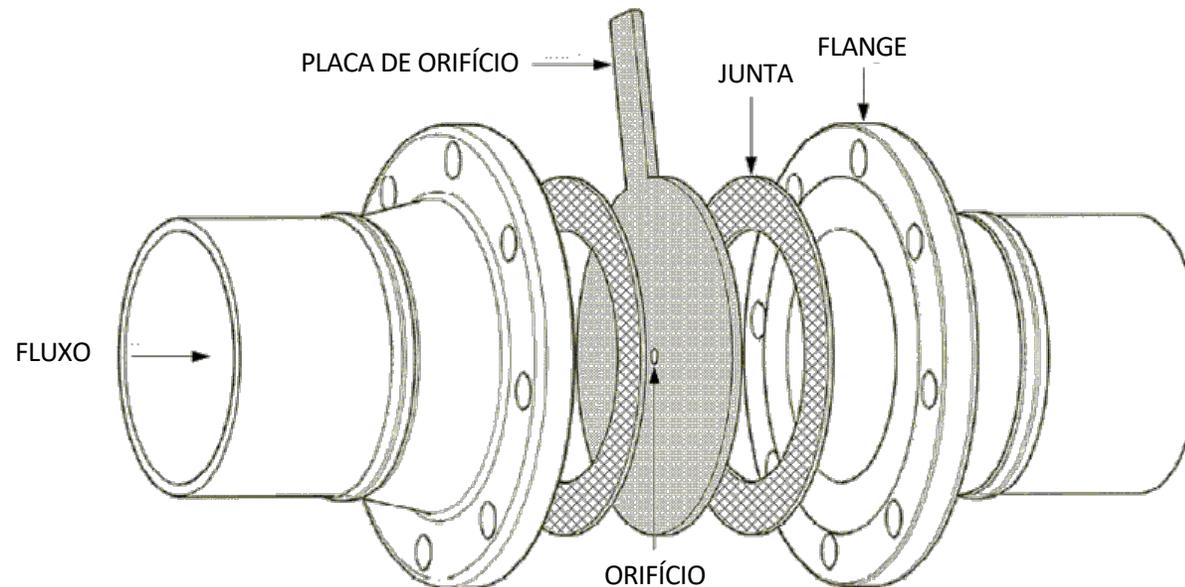
Notem que o projeto de sensores deprimogênios está fora do escopo deste curso.

Os principais tipos são apresentados a seguir.

# Placa de Orifício

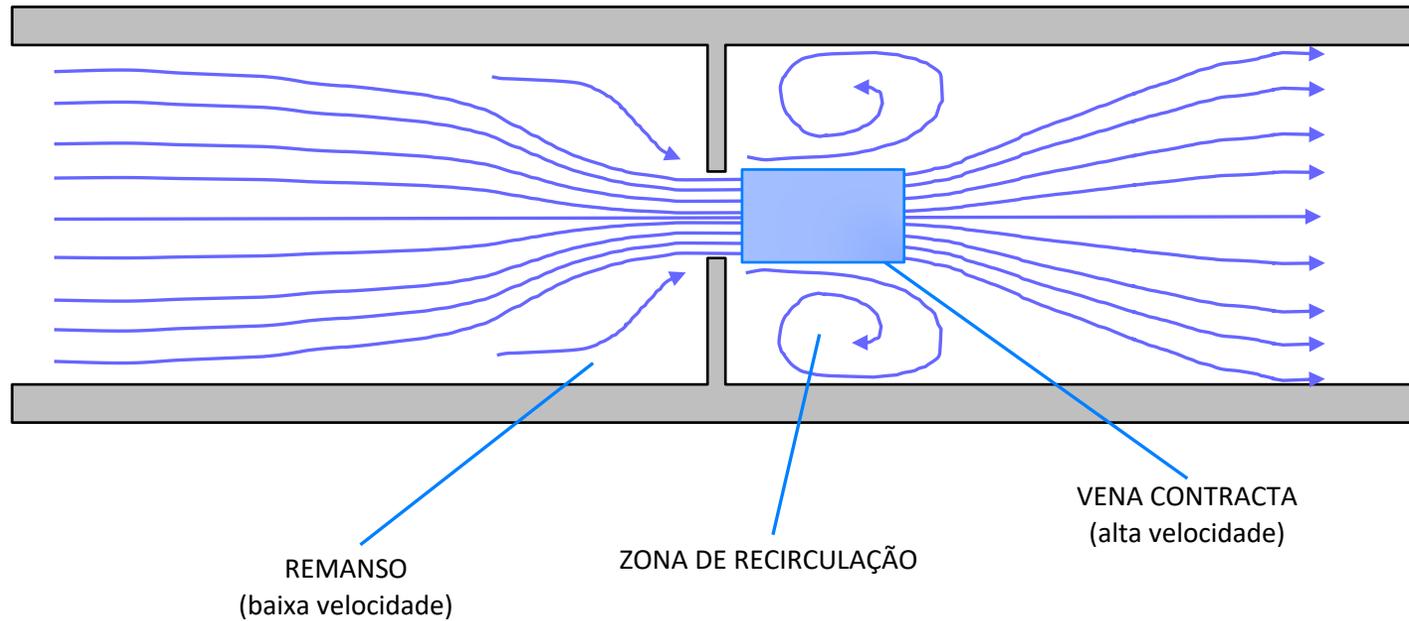
É possivelmente o mais utilizado tipo de sensor de vazão usado na Indústria. É também o mais simples e menos custoso dentre os sensores deprimogênicos.

Consiste em uma placa com um orifício (que serve como estreitamento) posicionada na seção transversal da tubulação. A queda de pressão ocasionada pela aceleração do fluido no orifício é utilizada para se obter a vazão.



# Placa de Orifício

O fluxo se reconfigura ao passar por um orifício conforme a figura abaixo.



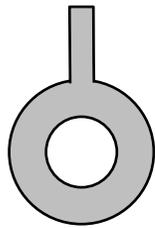
Deve-se tomar a pressão antes (baixa velocidade, alta pressão) e depois (alta velocidade, baixa pressão) do estrangulamento.

# Placa de Orifício

## Tipos de Orifício

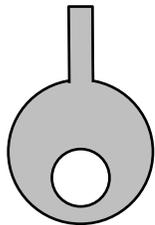
---

Tipos comuns de orifício incluem:



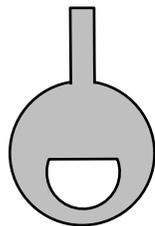
### ORIFÍCIO CONCÊNTRICO:

O tipo mais utilizado. Adequado para escoamento monofásico de gases e líquidos sem sólidos em suspensão.



### ORIFÍCIO EXCÊNTRICO:

Utilizado para fluídos com sólidos em suspensão, mistura água/óleo e vapor saturado (vapor úmido).



### ORIFÍCIO SEGMENTADO:

Para fluídos com sólidos em suspensão.

# Placa de Orifício

## Tipos de Borda

---

Tipos comuns de borda incluem:

-  BORDA QUADRADA  
 Utilizada para diâmetros maiores, em que a configuração do  fluxo (formação de vena contracta, etc.) não é crítica.
  
-  BORDA CHANFRADA  
 Utilizada para diâmetros menores ou vazões maiores para auxiliar a formação da vena contracta. 
  
-  BORDA ARREDONDADA  
 Utilizada para fluídos altamente viscosos, em que a perda de energia associada à colisão com um canto vivo é significativa. 
  
-  BORDA EM RAIOS QUADRANTES  
 Em forma de bocal na entrada e em forma de borda quadrada na saída. Utilizada para diâmetros pequenos ou fluídos de alta viscosidade. 

# Placa de Orifício

---

Medidores de orifício requerem que o fluxo a montante seja regularizado. Ao mesmo tempo eles provocam turbilhonamento e perda de carga a jusante.

Sob condições ideais a medida é bastante precisa.



# Bocal de Vazão

---

Bocais são dispositivos que conformam o fluxo de modo a criar uma configuração mais adequada à medição, propiciando maior sensibilidade com relação à pressão diferencial e uma vena contracta melhor definida.

São mais adequados que placas de orifício para

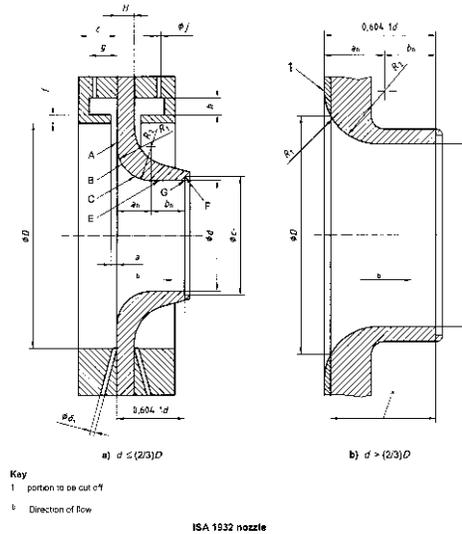
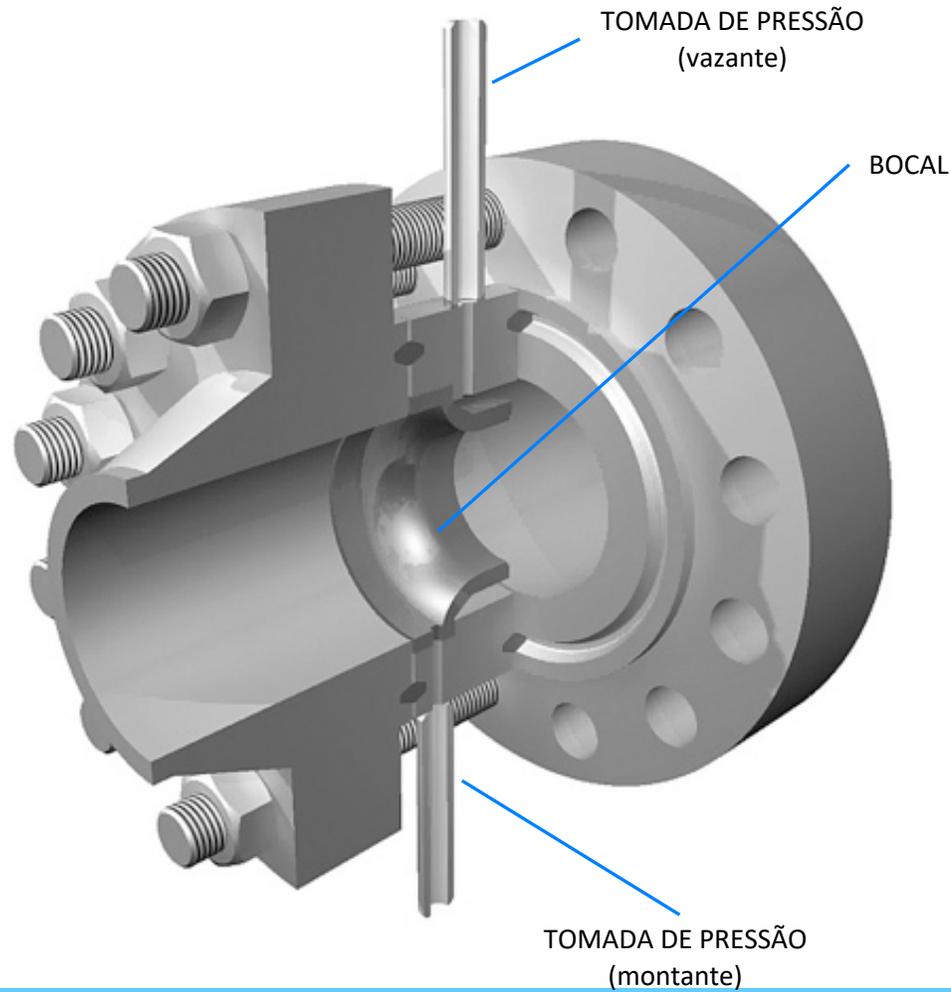
- vazões elevadas;
- fluídos pouco viscosos;
- fluídos com sólidos em suspensão;
- fluxo menos regular a montante;
- situações em que ocorre erosão ou cavitação em placas de orifício.

Os tipos mais comuns de bocais são

- Bocal ISA (ou ISA-1932), definido atualmente pela norma ISO 5167;
- Bocal ASME (American Society of Mechanical Engineers), atualmente ASME/NIST

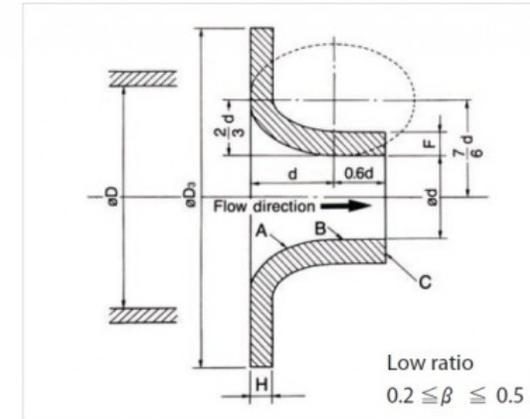
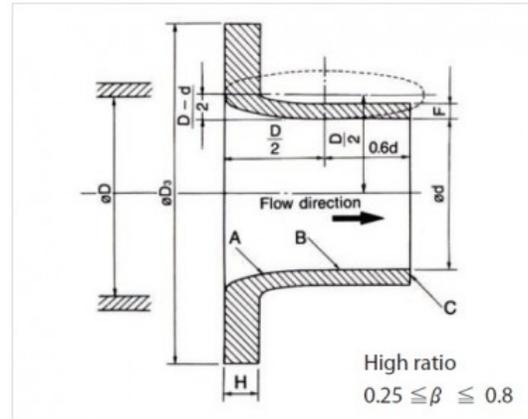
# Bocal de Vazão

BOCAL ISA:



# Bocal de Vazão

BOCAL ASME:

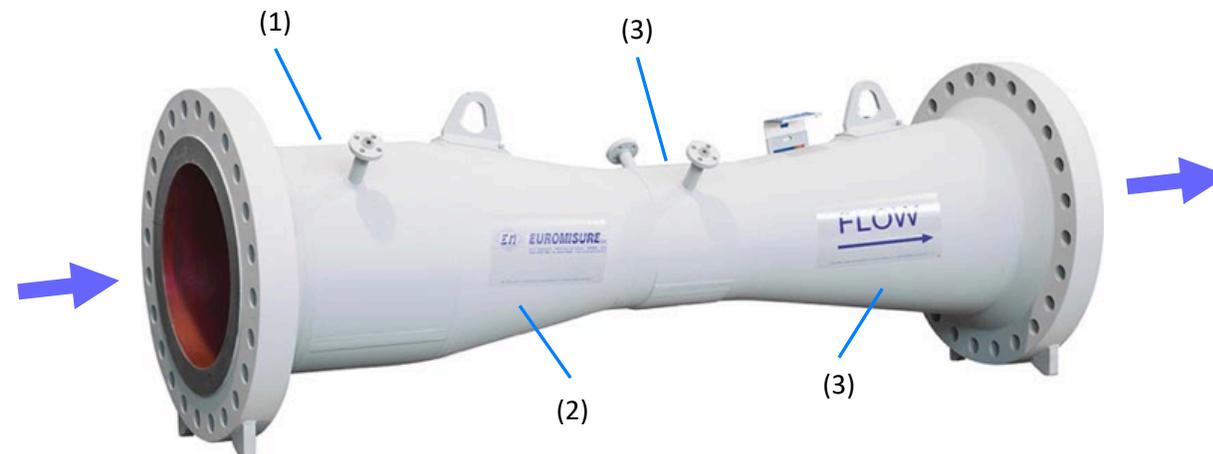


A diferença entre os bocais ISA e ASME reside basicamente no achatamento do perfil elíptico dos bocais.

# Tubo Venturi

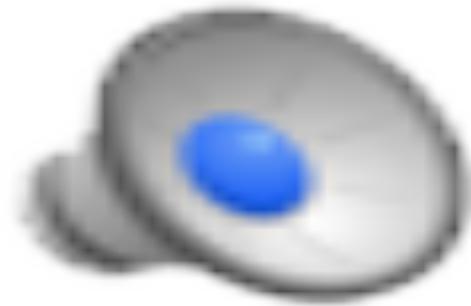
**TUBOS VENTURI** (1797) são dispositivos tubulares compostos por (de montante a jusante):

1. Um trecho cilíndrico (usualmente no diâmetro da tubulação) onde é feita a tomada da alta pressão (baixa velocidade);
2. Um trecho cônico, onde há um estreitamento do diâmetro do tubo;
3. Um trecho de diâmetro constante e estreitado onde é feita a tomada de baixa pressão (vena contracta – alta velocidade);
4. Um segundo trecho cônico, onde há um alargamento do diâmetro do tubo (usualmente até o diâmetro da tubulação).



# Tubo Venturi

---



Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=3dgtKYxwN7c>

# Tubo Venturi

---

Os tubos Venturi conformam o fluxo de maneira mais acentuada que os bocais de vazão (ou placas de orifício), de modo que provocam uma perda de carga menor para uma mesma pressão diferencial.

Potencialmente são mais precisos que os outros dispositivos.

Por outro lado são dispositivos maiores (o que pode ser um problema para instalação).

Como outros dispositivos deprimogênicos, requerem regularização do fluxo a montante e geram turbulências a jusante

A norma ISO 5167 normatiza o dimensionamento e especificação de tubos Venturi para diferentes situações e diâmetros de tubulação.



# Tubo Venturi

---

A tomada de pressão pode ser feita através de diversos pontos conectados por uma tubulação em anel denominada ANEL PIEZOMÉTRICO, que produz uma espécie de média das tomadas de pressão ao longo da seção transversal do tubo.



# Tubo Venturi

---



Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=oUd4WxjoHKY>

# Regularização de Fluxo

---

Placas de orifício, bocais ou tubos Venturi, assim como outros dispositivos deprimogênicos, têm a qualidade da medida afetada pela irregularidade do fluxo a montante (e.g. turbulência, rotação, etc.).

É recomendável sua instalação após trechos retos de tubulação sem penetrações ou obstruções (por exemplo, a norma ISO 5167 considera esse fator na especificação dos dispositivos).

Em diversas situações é necessário regularizar o fluxo para se ter uma medida mais precisa. Para tanto há dispositivos que podem ser instalados na tubulação para esse fim, chamados **REGULARIZADORES DE FLUXO** ou **CONDICIONADORES DE FLUXO**.

Condicionadores de fluxo regularizam o fluxo à custa de perda de carga na tubulação.

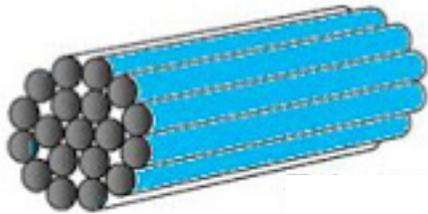
# Regularização de Fluxo

---

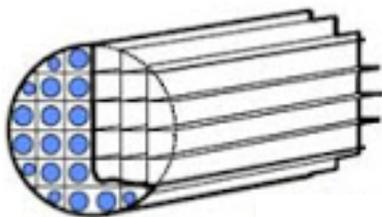
Tipos comuns incluem:



Sprengle (usualmente líquidos)



Tubular (usualmente líquidos)

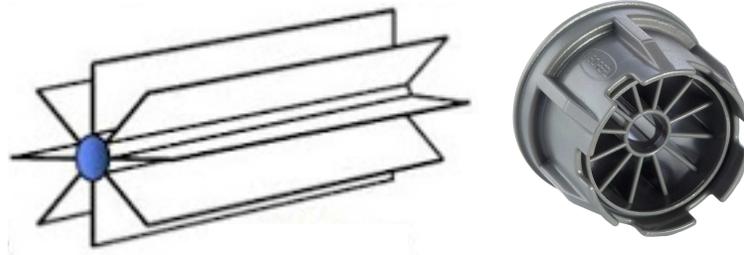


Zanker

# Regularização de Fluxo

---

Tipos comuns incluem:



Aletado ou Étoile

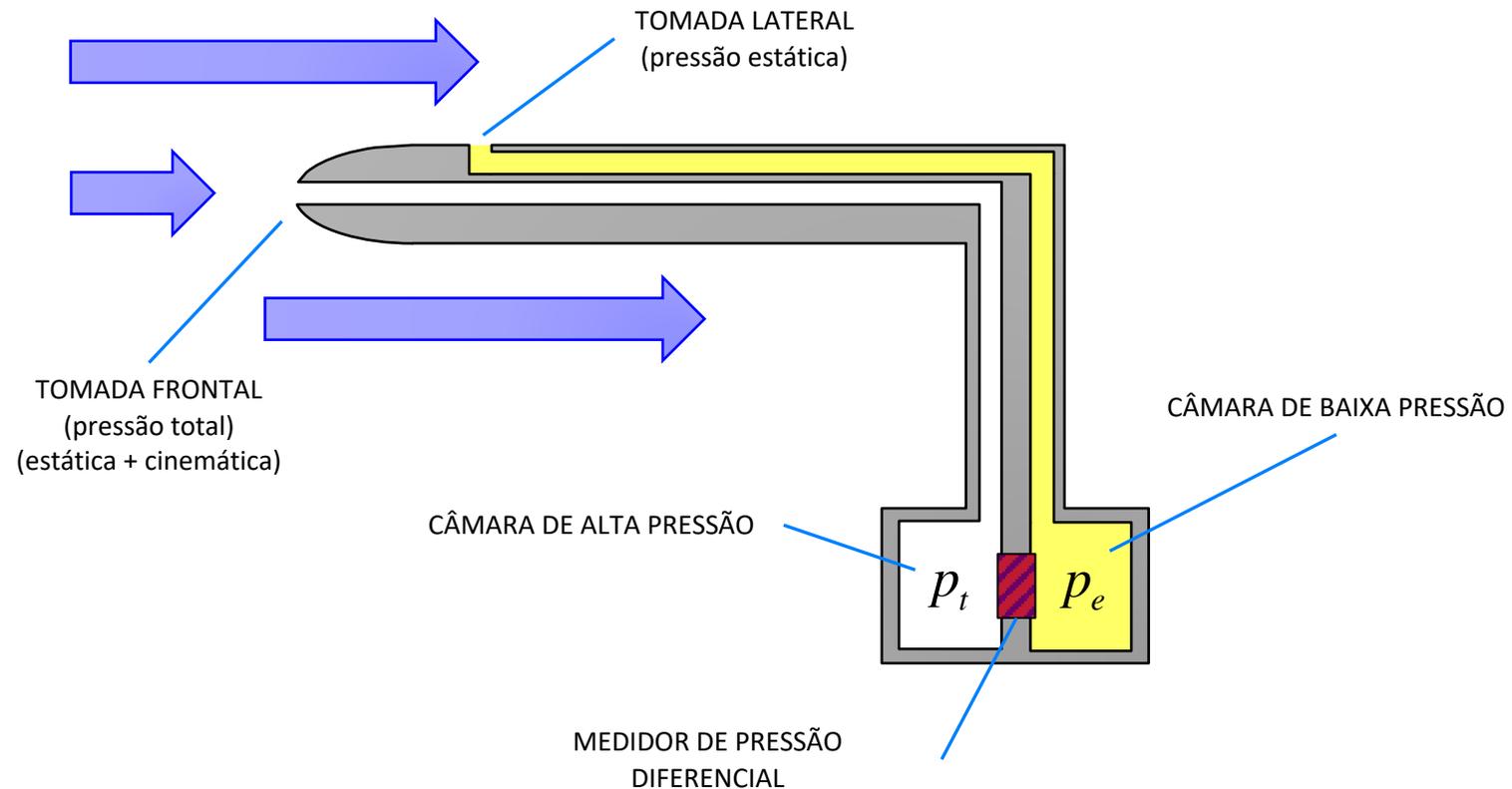


Vortab (usualmente gases)

e muitos outros.

# Tubo de Pitot

TUBOS DE PITOT são tomadas de pressão conformadas para medir ao mesmo tempo a pressão estática (em uma tomada) e a pressão total (em outra tomada).



# Tubo de Pitot

---

Temos, para um fluido perfeito, que

$$p_t = p_e + p_c$$

onde  $p_c$  é a pressão cinemática, que depende da velocidade do fluido. Da equação de Bernoulli,

$$p_c = \frac{\rho V^2}{2}$$

onde  $V$  é a velocidade do fluido.

Daí pode-se estimar a velocidade do fluido e a vazão a partir da diferença de pressão entre as tomadas do tubo de Pitot.

Tubos de Pitot podem funcionar tanto como sensores de vazão como de velocidade.

# Tubo de Pitot

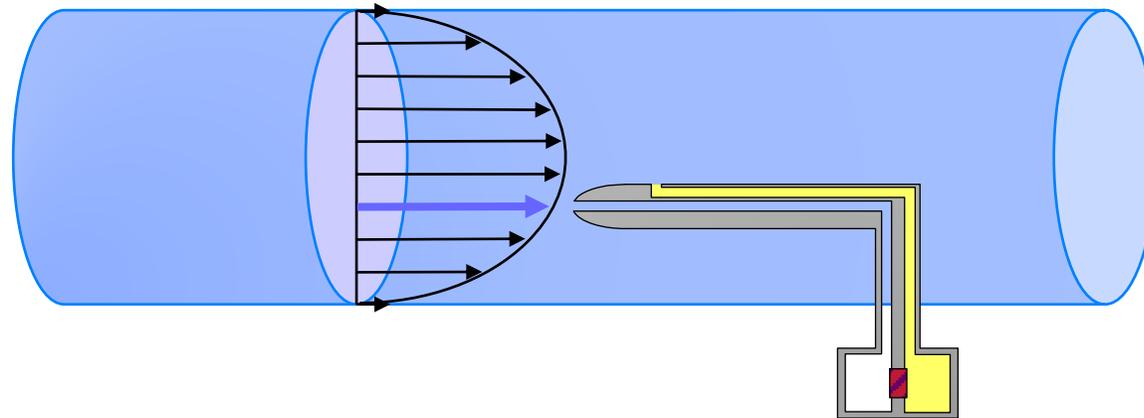
---

Tubos de Pitot são o dispositivo clássico para se determinar a velocidade de aviões e barcos. Nesse caso o fluido se encontra parado e o tubo de Pitot é que se desloca.



# Tubo de Pitot

Em tubulações, conforme vimos, a velocidade do fluido varia ao longo da seção transversal.



Um tubo de Pitot colocado em um ponto específico da tubulação mediria a velocidade do fluido apenas naquele ponto, o que forneceria uma estimativa muito precária da vazão.

Para mitigar esse problema pode-se colocar vários tubos ao longo da seção ou tubos especiais que tomam a pressão total em vários pontos.

# Tubo de Pitot

---

Quando o tubo de Pitot coleta a pressão total em uma única tomada, diz-se que é uma **sonda singela**. Dispositivos que coletam a pressão total em várias tomadas denominam-se **sondas múltiplas**.

A ideia é utilizar várias tomadas interconectadas ao longo do perfil da tubulação, de modo que a pressão medida na câmara interna é uma espécie de média do perfil do escoamento.



# Tubo de Pitot

O design mais conhecido de sonda múltipla é o tubo **Annubar** (marca registrada e patente da Emerson/Rosemount), que tem um perfil em “T”.



com sensor de temperatura  
incorporado para estimar  
vazão mássica



MONTANTE  
(alta pressão)

JUSANTE  
(baixa pressão)

# Tubo de Pitot

---

Tubos de Pitot são adequados para medição de vazão em qualquer diâmetro de tubulação ou faixa de vazão (desde que o escoamento seja monofásico).

Não são adequados a fluídos com impurezas ou partículas em suspensão, que podem bloquear o tubo.

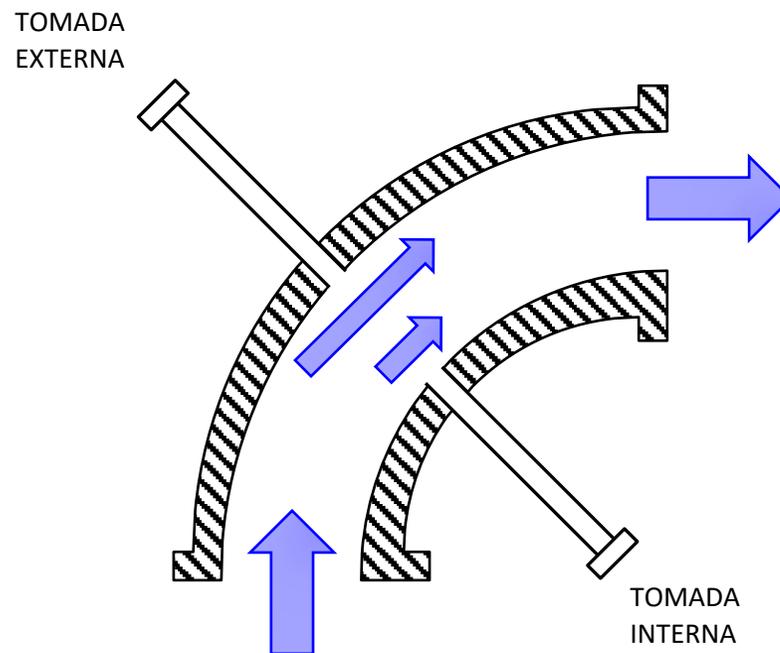
Pitots tendem a acumular umidade quando em operação em ar, meios gasosos ou vapor e podem ser bloqueados por gelo em caso de expansão súbita do vapor (por perda de pressão) ou queda de temperatura. Pitots utilizados em aviação normalmente têm aquecedores para impedir esse fenômeno.

Foi este o problema (congelamento dos tubos de Pitot) que iniciou o acidente com o voo 477 da Air France em 2009.

OBS. Havia redundância dos sensores, mas ocorreu uma falha de modo comum (tema de outra parte do curso).

# Medidores Centrífugos

**MEDIDORES CENTRÍFUGOS** ou **MEDIDORES DE COTOVELO** consistem de um trecho curvo de tubulação com tomadas de pressão nos arcos interno (baixa pressão) e externo (alta pressão).



Quando há escoamento, a pressão no arco interno é maior que no arco externo. Essa diferença é devida ao perfil de velocidades de escoamento no trecho curvo (maior velocidade no arco externo do que no interno).

# Medidores Centrífugos

---

Medidores centrífugos são menos precisos que dispositivos semelhantes (i.e. Venturis, bocais ou placas de orifício), são mais sensíveis à conformação do fluxo a montante e causam perturbações a jusante.

Requerem uma curva na tubulação, o que pode ser um problema para a instalação.

Por outro lado, se precisão não for um problema, pode-se aproveitar um cotovelo já previsto ou existente para se obter uma medida de vazão a um custo mais baixo.



# De Pressão a Vazão

---

De acordo com a equação de Bernoulli, em sensores deprimogênios, a vazão é proporcional à raiz quadrada da pressão diferencial.

Esta é uma relação que também se verifica na prática. Antigos sensores analógicos possuem módulos de extração de raiz quadrática de sinais elétricos ou pneumáticos para que se pudesse utilizar sensores de pressão para medir vazão.

Hoje em dia isso é feito digitalmente pelos sensores, incluindo a aplicação de curvas características e termos de calibração.