

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS**



Operações Unitárias I

Introdução a transferência de quantidade de movimento

TRANSPORTE DE FLUIDO

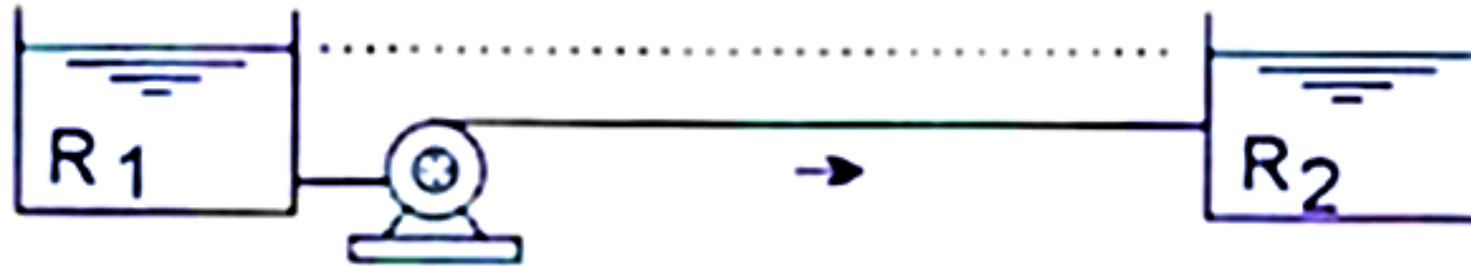
AULA 23

Profa. Dra. Bianca Chierigato Maniglia

biancamaniglia@usp.br

biancamaniglia@iqsc.usp.br

2) Traçar as curvas características de uma tubulação de PVC com diâmetro interno de 0,1 m para bombear água entre dois tanques abertos até a vazão máxima de 150 m³/h sendo a diferença de altura estática igual a zero e sabendo-se que o comprimento total das tubulações de sucção e descarga é de 700 m (utilize a equação de Hazen-Williams para o cálculo da perda de carga e despreze a perda localizada em acidentes).



Usar $Q \Rightarrow \text{m}^3/\text{s}$

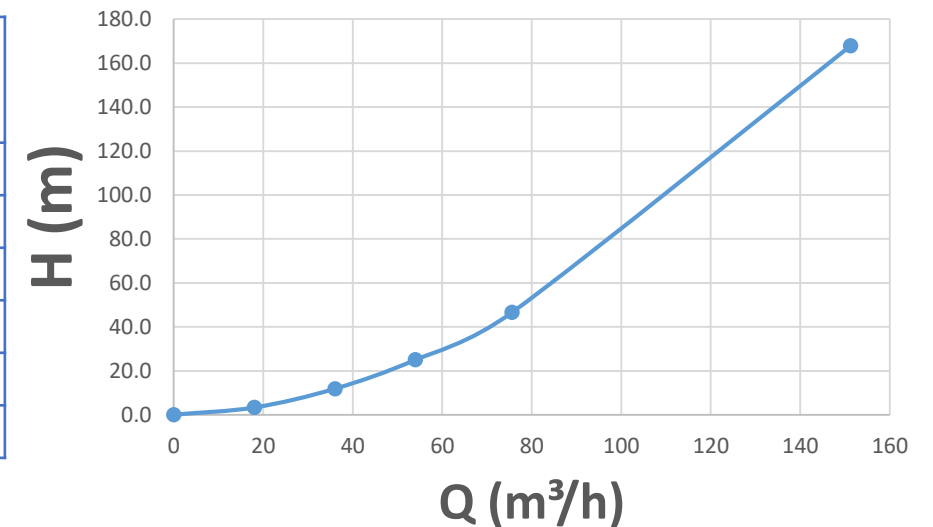
$$h_{\text{f}} = 10,643 \frac{L}{D^{4,87}} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,85}$$

onde: h_{f} = perda de carga (m)
 L = comprimento da tubulação (m)
 Q = vazão volumétrica (m³/s)
 D = diâmetro interno do tubo (m)

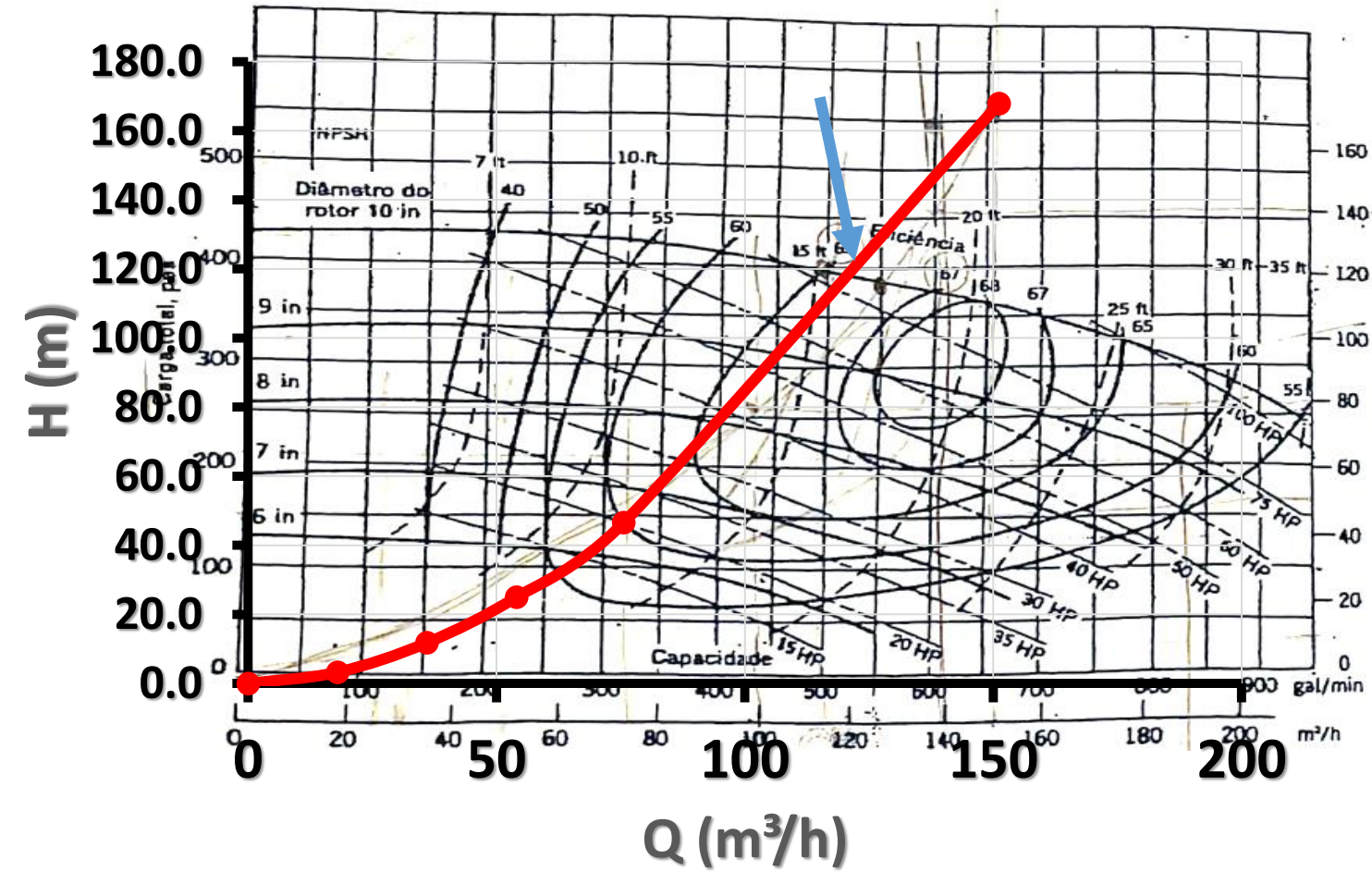
$C = 140$ (para PVC)

$D = 0.1$ m

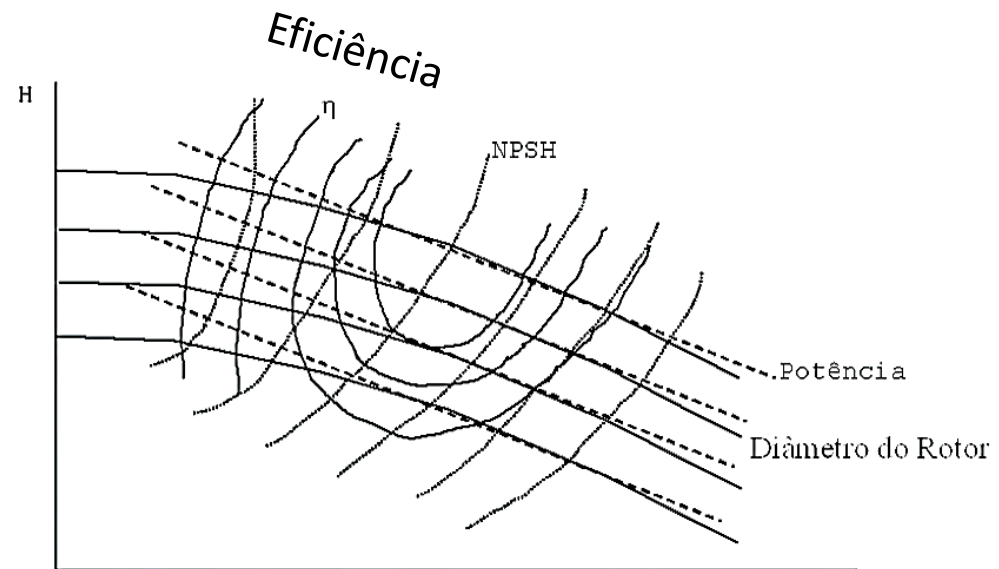
Q (m ³ /s)	H (m)	Q (m ³ /h)	H (m)
0.042	167.8	150	167.8
0.021	46.6	75	46.6
0.015	25.0	54	25.0
0.01	11.8	36	11.8
0.005	3.3	18	3.3
0	0.0	0	0.0



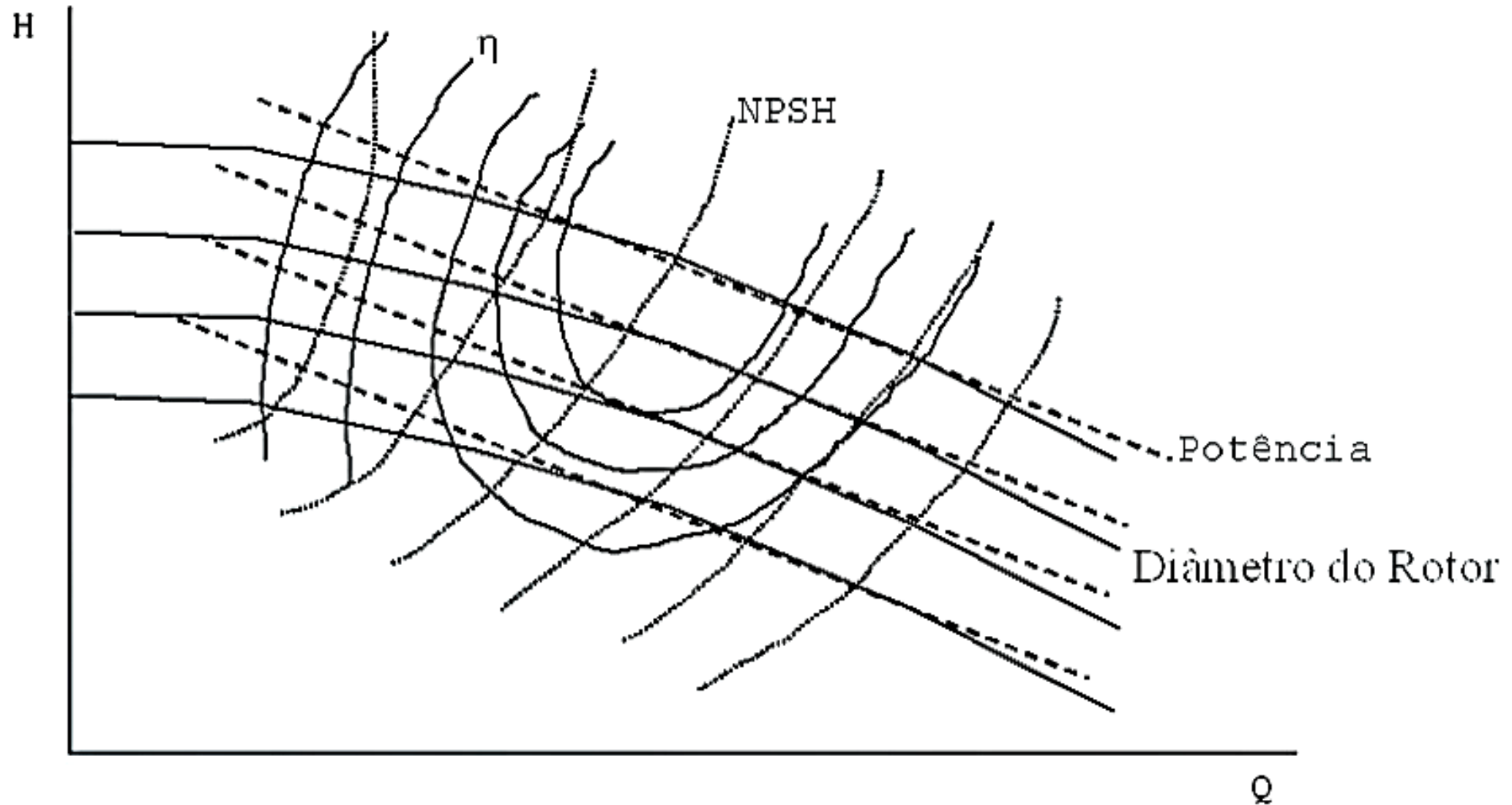
3) Determine o ponto normal de trabalho para o exercício 2 no caso de se utilizar a bomba da Figura D.b (anexo), com rotor de 10 in.



Eficiência = 66%
Potência = 80 HP



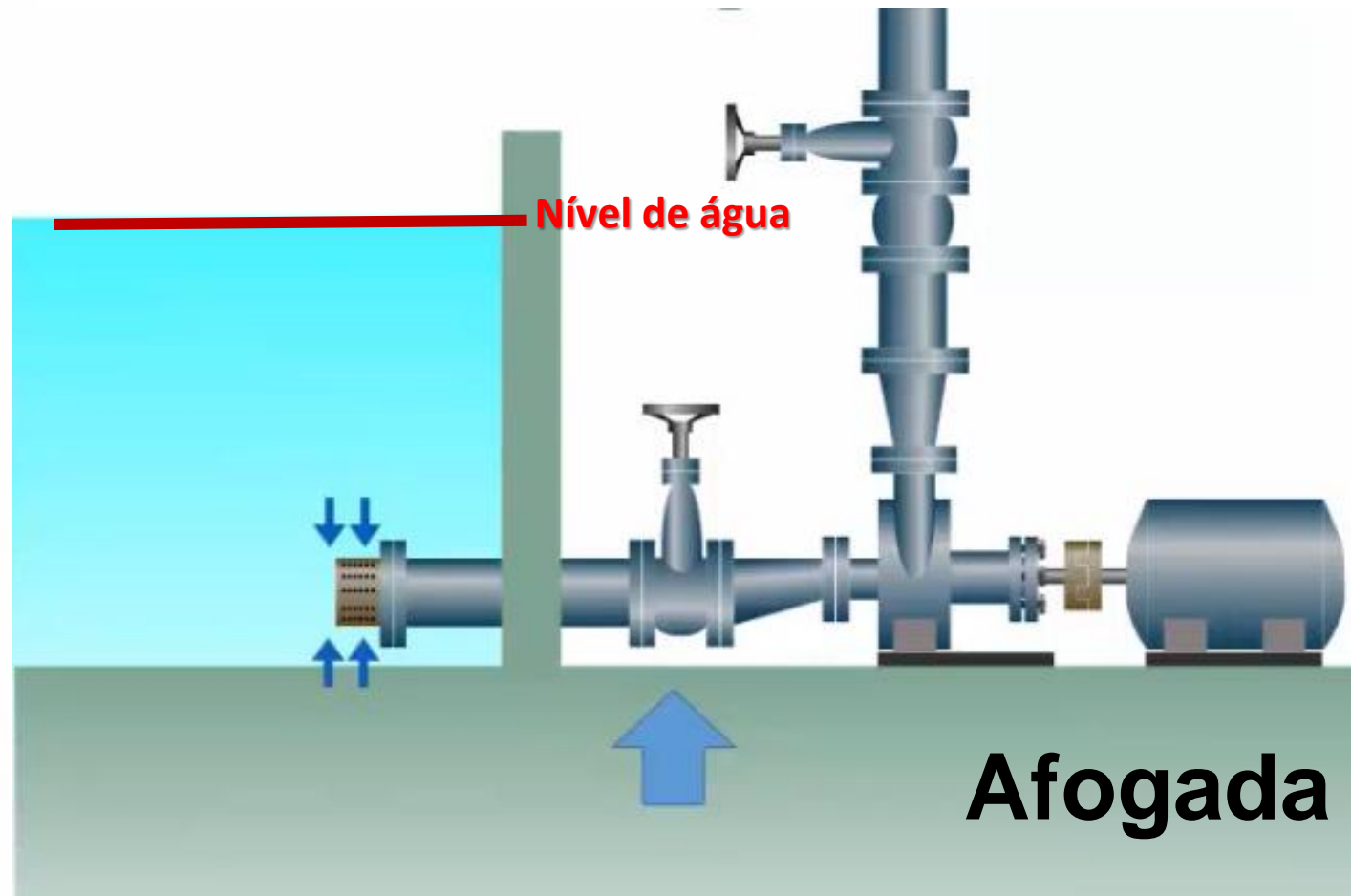
Curva de uma bomba (fabricante)



Bomba e o nível da água



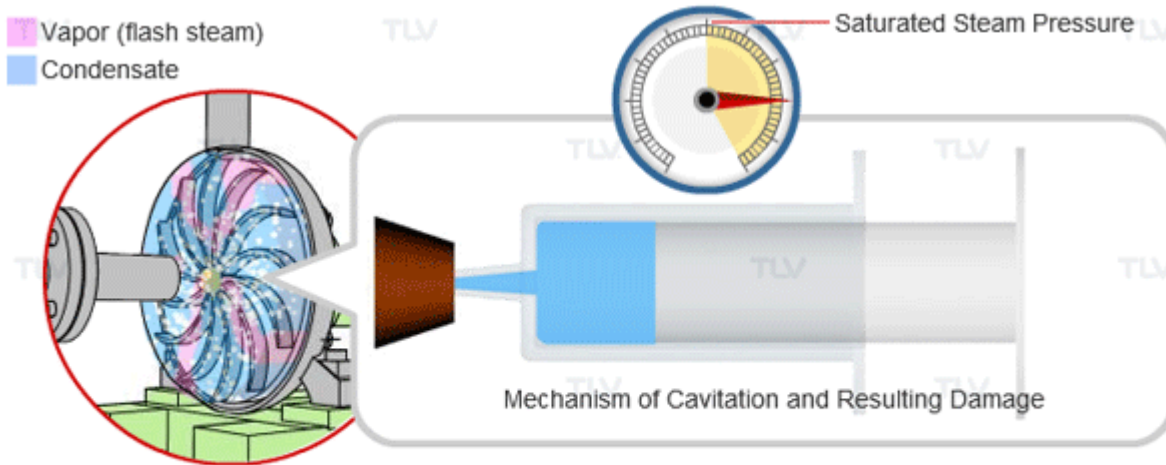
Bomba com sucção positiva



Bomba com sucção negativa

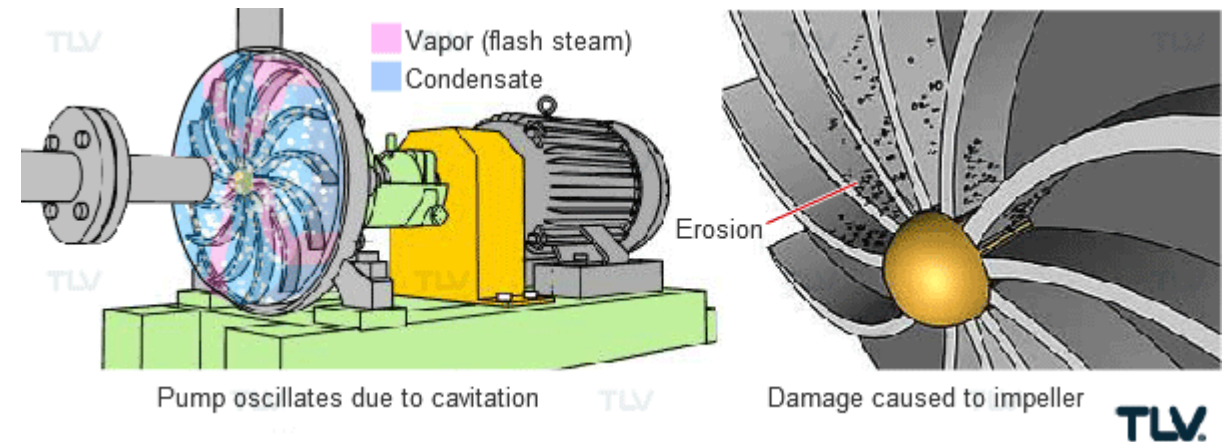
Cavitação

$P_{\text{entrada da bomba}} < P_{\text{pressão de vapor do líquido bombeado}}$ (parte do líquido se vaporiza)



When the pressure of the condensate falls beneath saturated steam pressure, vapor cavities form, resulting in unstable impeller rotation, decreased pumping efficiency, and irregular oscillations in the pump. These vapor cavities may condense and suddenly implode, causing damage to the impeller and pump casing.

Outros inconvenientes incluem:
vibrações e danificação da bomba.



NPSH (*Net Positive Suction Head*)

Carga líquida positiva de sucção

Disponível

Instalação

Pressão

que a instalação disponibiliza

Requerido

Equipamento

Pressão

que a bomba necessita

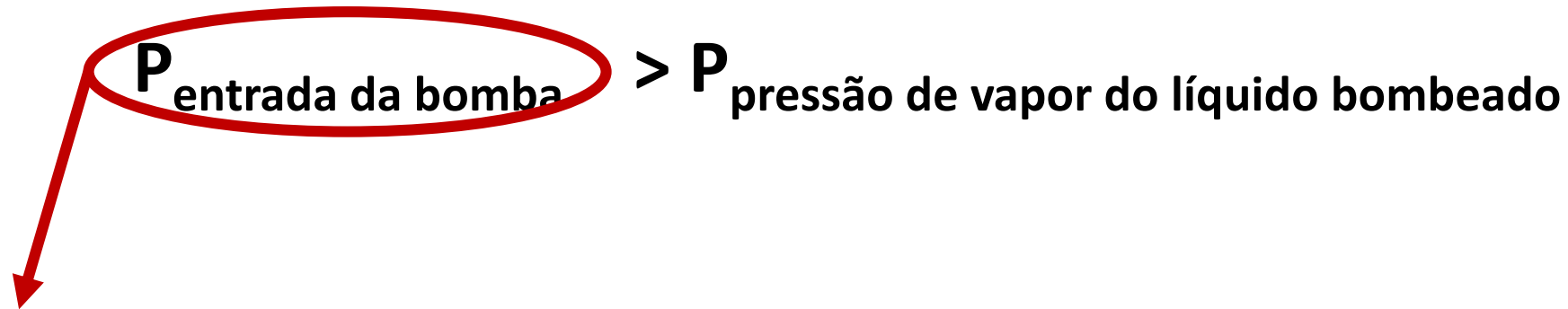
NPSH → pressão → mca (metros de coluna de água)

10 mca = 1 kgf/cm² = 0,98 bar = 735,5 mmHg = 14,22 psi

NPSH (*Net Positive Suction Head*) **requerido**

EVITAR CAVITAÇÃO => $P_{\text{entrada da bomba}} > P_{\text{pressão de vapor do líquido bombeado}}$

Entrada da bomba => ponto de menor pressão, deve-se evitar que a pressão neste ponto seja reduzida à pressão de vapor.

 $P_{\text{entrada da bomba}} > P_{\text{pressão de vapor do líquido bombeado}}$

NPSH_{requerido} => CARACTERÍSTICA DA BOMBA
FABRICANTE

NPSH (*Net Positive Suction Head*) disponível

✓ Característica da instalação

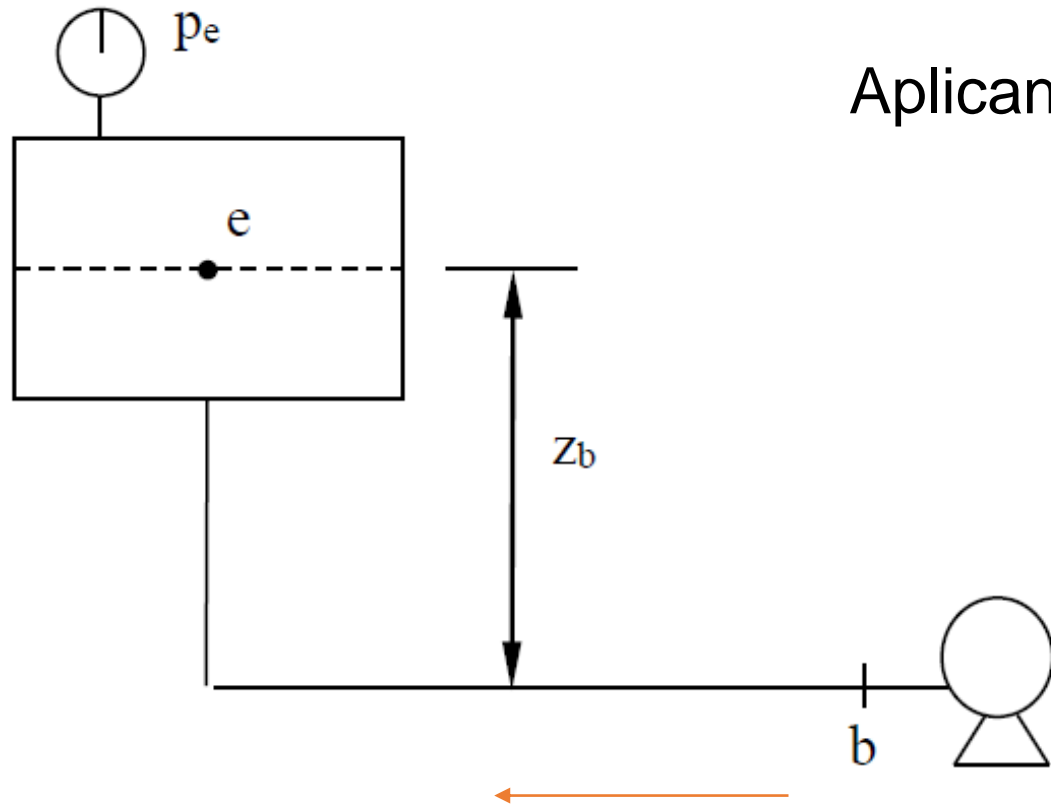
$$\text{NPSH}_{\text{disp}} > \text{NPSH}_{\text{req.}}$$



Calculado

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} \geq \text{NPSH}_{\text{req.}} + 1 \text{ m} \quad \text{de líquido}$$

Cálculo do $NPSH_{\text{disponível}}$



Aplicando o balanço de Energia Mecânica entre e e b

Tanque grande \Rightarrow velocidade de escoamento é baixa

$$\frac{P_e}{\gamma} + \frac{v_e^2}{2g} + z_b = \frac{P_b}{\gamma} + \frac{v_b^2}{2g} + \cancel{0} + l_{wf}$$

altura

$$\frac{P_b}{\gamma} + \frac{v_b^2}{2g} = \frac{P_e}{\gamma} + z_b - l_{wf}$$

P_e e P_b = pressões absolutas

$NPSH_{disp}$ = carga existente no bocal de sucção – carga da pressão de vapor

$$NPSH_{disp} = \frac{P_b}{\gamma} + \frac{v_b^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma} = \frac{P_b - P_v}{\gamma} + \frac{v_b^2}{2g}$$

$$NPSH_{disp} = \frac{P_e}{\gamma} + z_b - l_{wf} - \frac{P_v}{\gamma} = \frac{P_e - P_v}{\gamma} + z_b - l_{wf}$$

$$NPSH_{disp} = \frac{P_b - P_v}{\gamma} + \frac{v_b^2}{2g} = \frac{P_e - P_v}{\gamma} + z_b - l_{wf}$$

Onde: P_e = pressão absoluta no reservatório de sucção

P_v = pressão de vapor do líquido na temperatura de bombeamento

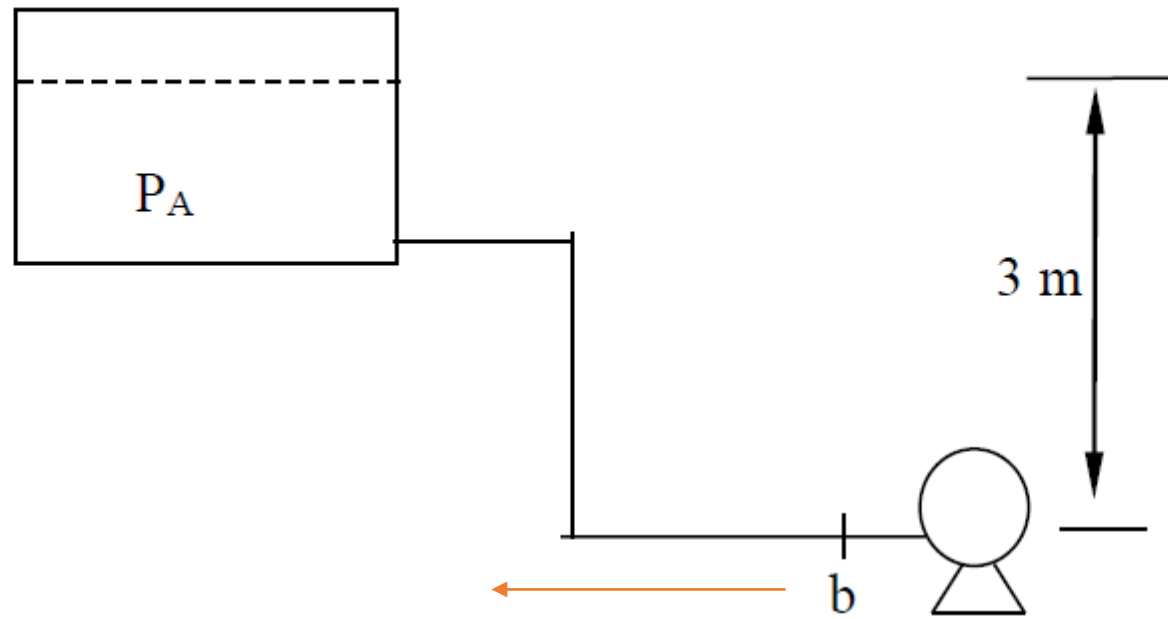
(Tabela I (Anexo))

z_b = altura estática de sucção

P_b = pressão absoluta na sucção da bomba

EXEMPLO NPSH:

1)



$$P_{\text{vapor}} = 0,018 \text{ kgf/cm}^2 = 0,18 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$l_{\text{wf}} = 2,4 \text{ m}$$

$$P_A = 0,95 \text{ kgf/cm}^2 = 9,5 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$$

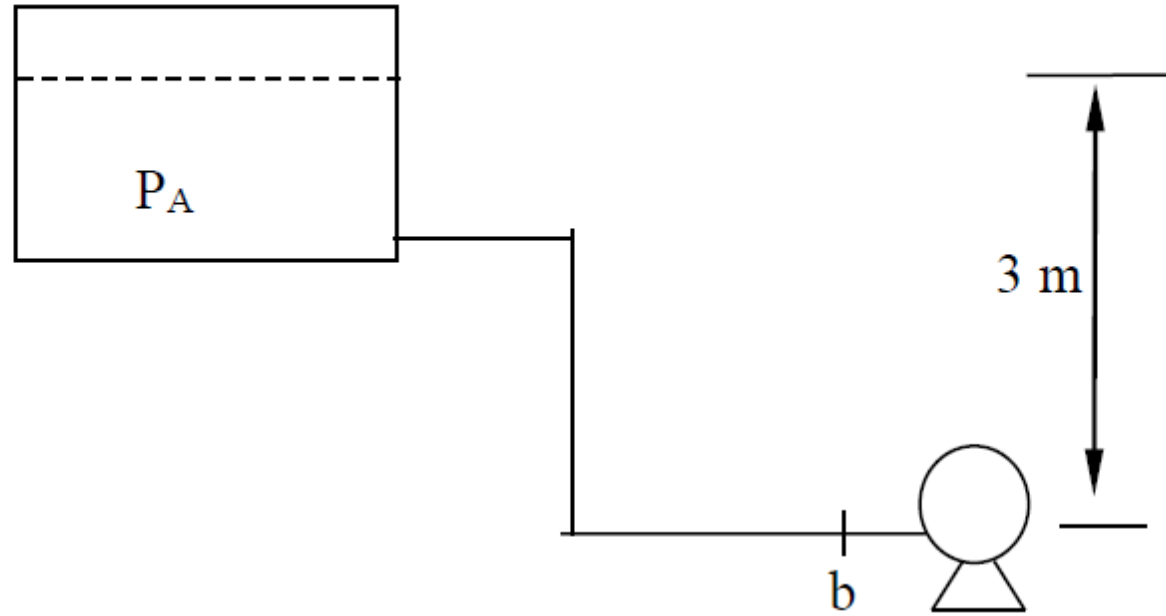
$$\gamma = 10^4 \text{ N/m}^3$$

$$\frac{P_A}{\gamma} + z_A = \frac{P_b}{\gamma} + \frac{v_b^2}{2g} + l_{\text{wf}}$$

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} = \frac{P_b - P_v}{\gamma} + \frac{v_b^2}{2g} + l_{\text{wf}} = \frac{P_A - P_v}{\gamma} + z_A$$

EXEMPLO NPSH:

1)



$$P_{\text{vapor}} = 0,018 \text{ kgf/cm}^2 = 0,18 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$\ell_{\text{wf}} = 2,4 \text{ m}$$

$$P_A = 0,95 \text{ kgf/cm}^2 = 9,5 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$$

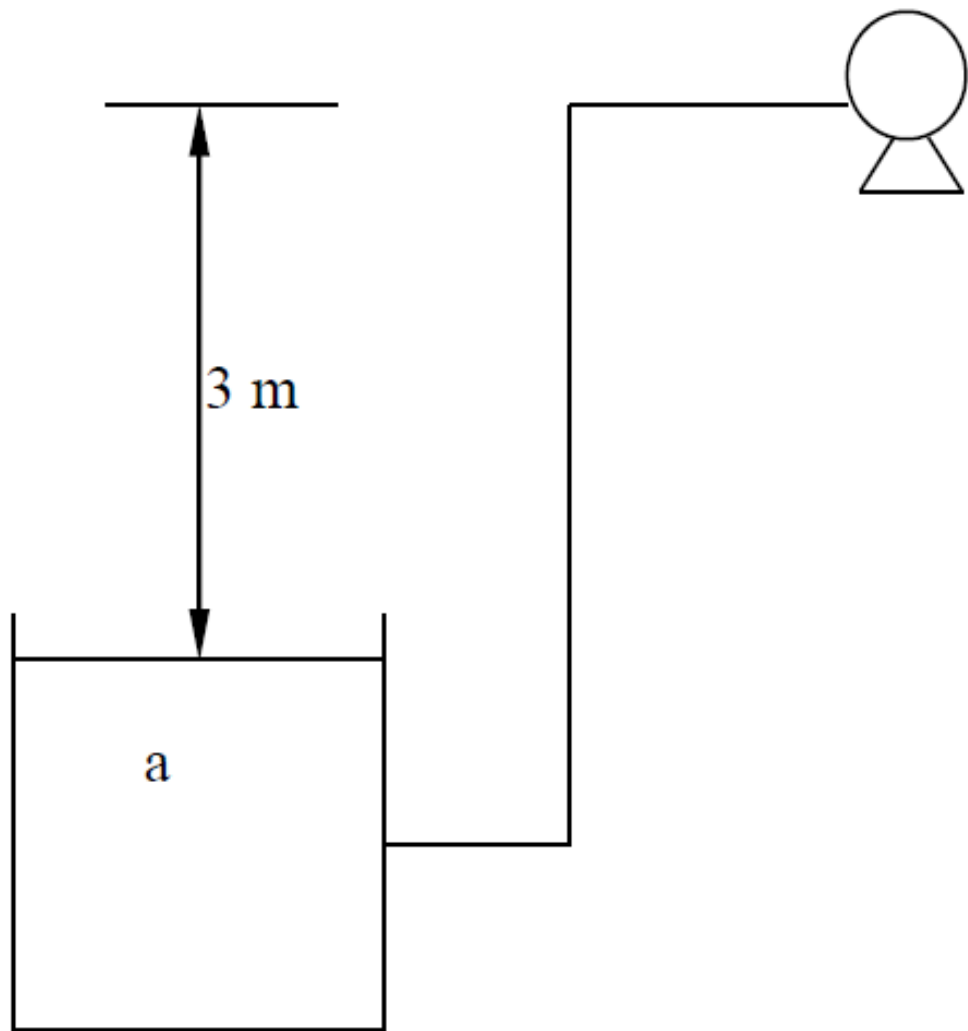
$$\gamma = 10^4 \text{ N/m}^3$$

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} = \frac{P_b - P_v}{\gamma} + \frac{v_b^2}{2g} = \frac{P_A - P_v}{\gamma} + z_A - \ell_{\text{wf}}$$

$$= \frac{(9,5 - 0,18) \cdot 10^4}{10^4} + 3 - 2,4$$

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} = 9,92 \text{ m}$$

2)



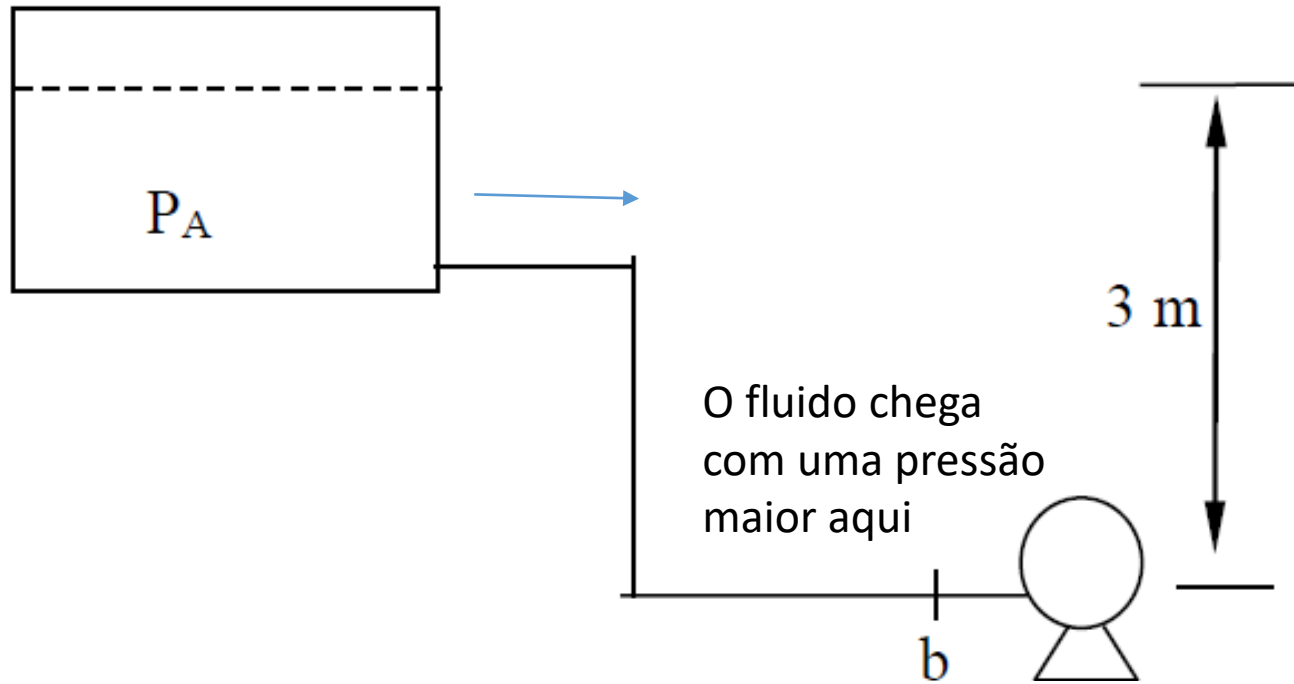
$$\ell_{wf} = 2,4 \text{ m}$$

$$P_v = 0,018 \text{ kgf/cm}^2 = 0,18 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$P_a = 0,95 \text{ kgf/cm}^2 = 9,5 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{NPSH}_{\text{disp}} &= \frac{P_a - P_v}{\gamma} + z_a - \ell_{wf} \\ &= \frac{(9,5 - 0,18) \cdot 10^4}{10^4} - 3 - 2,4 \end{aligned}$$

$$\boxed{\text{NPSH}_{\text{disp}} = 3,92 \text{ m}}$$

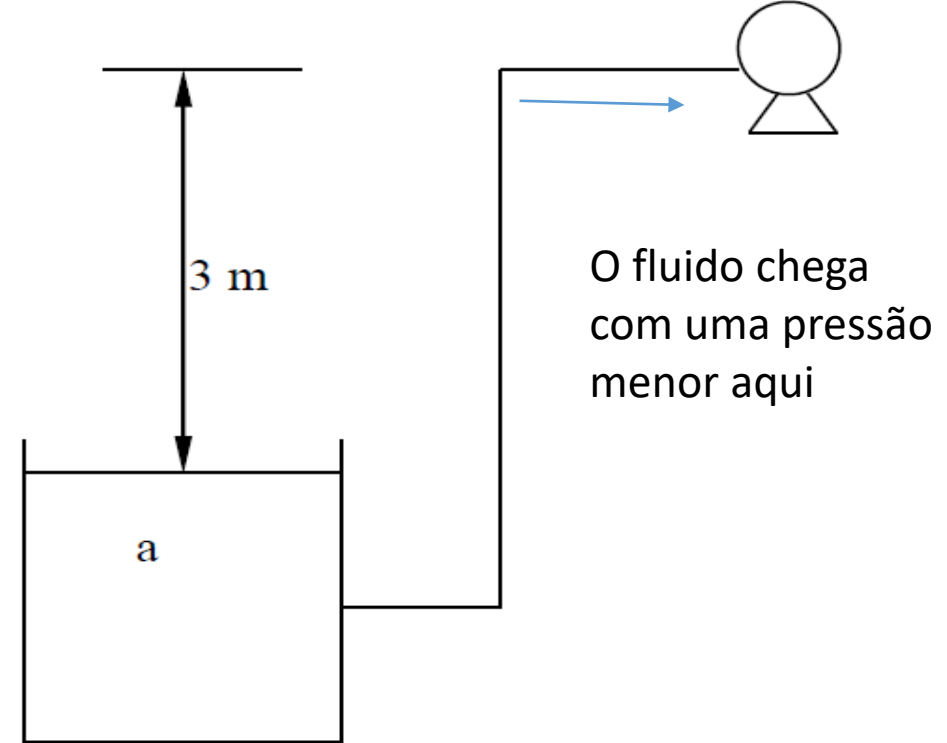


$$NPSH_{disp} = \frac{P_b - P_v}{\gamma} + \frac{v_b^2}{2g} = \frac{P_A - P_v}{\gamma} + z_A - l_{wf}$$

$$= \frac{(9,5 - 0,18) \cdot 10^4}{10^4} + 3 - 2,4$$

$$NPSH_{disp} = 9,92 \text{ m}$$

ok



$$NPSH_{disp} = \frac{P_a - P_v}{\gamma} + z_a - l_{wf}$$

$$= \frac{(9,5 - 0,18) \cdot 10^4}{10^4} - 3 - 2,4$$

$$NPSH_{disp} = 3,92 \text{ m}$$

Não

9.92 >>> 3.92
 $P_{\text{entrada da bomba}} > P_{\text{pressão de vapor do líquido bombeado}}$

Evitar cavitação

Exemplo => $NPSH_{req} = 5 \text{ m}$

$NPSH_{disp} \geq NPSH_{req} + 1 \text{ m}$

Medidores de Vazão

- ✓ Controle de processos industriais => quantidade de material que entra e sai
- ✓ Vazão de fluidos => aplicação do balanço de energia.
- ✓ Medidores de vazão => evidencia uma queda de pressão que pode ser medida e relacionada à vazão.
- ✓ Queda de pressão => modificação da energia cinética, ou pelo atrito, ou pelo arraste.

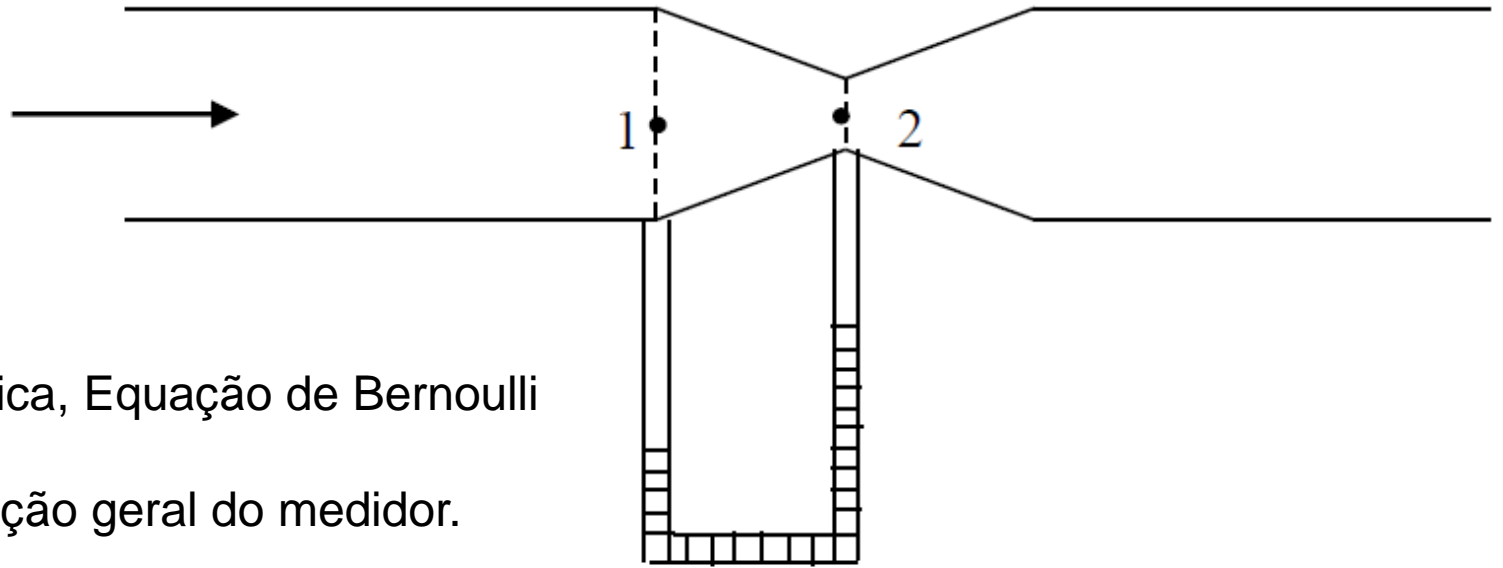
Medidores de vazão => diferença de pressão numa secção sensível do dispositivo

Medidor de pressão simples => **o manômetro de TUBO em U**

Os medidores de vazão mais comuns são:

- ✓ Tubo de Venturi
- ✓ Medidores de Orifício
- ✓ Tubos de Pitot
- ✓ Rotâmetros

Tubo de Venturi



Aplicando o Balanço de Energia Mecânica, Equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2, temos a equação geral do medidor.

$$Q = C_v A_2 \sqrt{\frac{2(-\Delta P)}{\rho(1 - \beta^4)}} \quad \beta = \frac{D_2}{D_1}$$

$$p/Re > 10.000 \quad \rightarrow \quad C_v = 0,98$$

$$Re < 10.000 \quad \rightarrow \quad C_v \text{ varia com } Re$$

C_v é determinado experimentalmente, medindo a vazão e o ΔP correspondente.

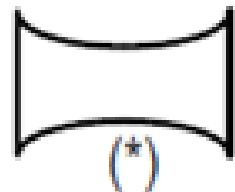
C_v é colocado num gráfico em função do nº de Reynolds.



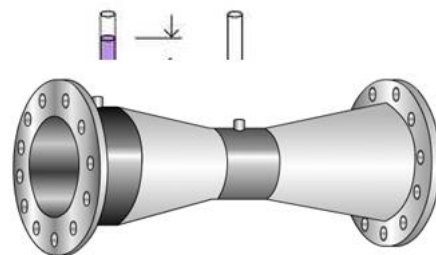
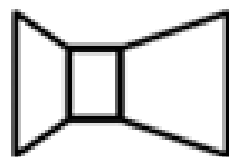
Vantagens:

- Queda de pressão mínima
- Minimiza o desgaste e entupimento, permitindo que o fluxo limpe sólidos suspenso através dele sem obstrução.

Simbologia:



ou



$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Desvantagens:

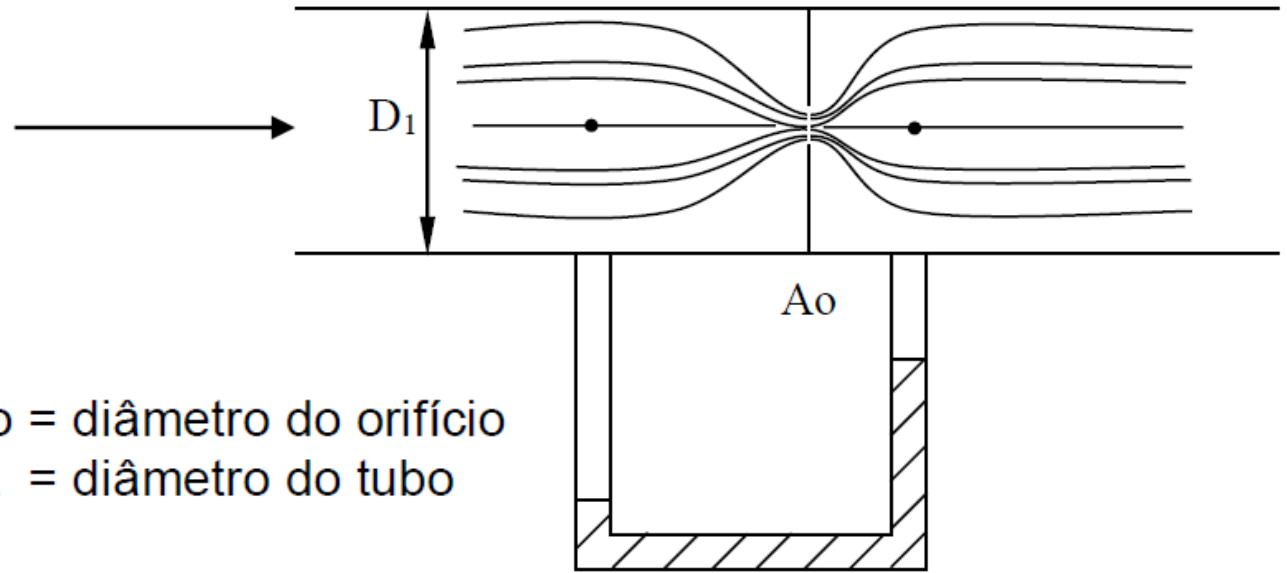
- São menos precisos do que a placa de orifício.
- Para maior precisão, cada tubo Venturi tem de ser calibrado, passando fluxos conhecidos através do Venturi e gravando as pressões diferenciais resultantes
- A pressão diferencial gerado por um tubo de Venturi é inferior que da placa de orifício e, portanto, um transmissor de fluxo de alta sensibilidade é necessário.
- É mais volumoso e mais caro.

Medidor de orifício

$$Q = \frac{C_o A_o}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

$$\beta = \frac{D_o}{D_t}$$

onde D_o = diâmetro do orifício
 D_t = diâmetro do tubo

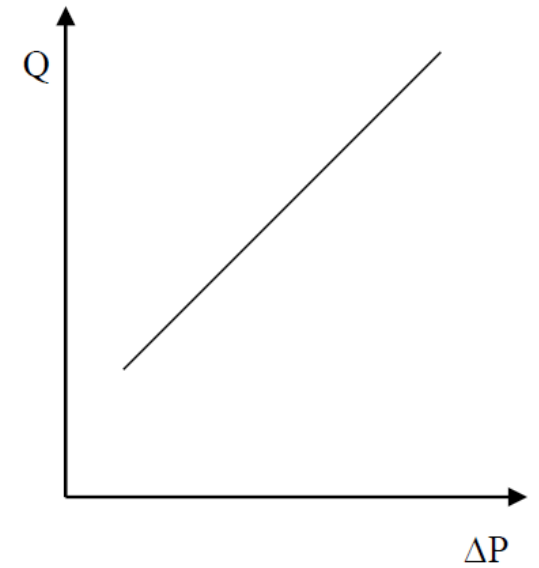
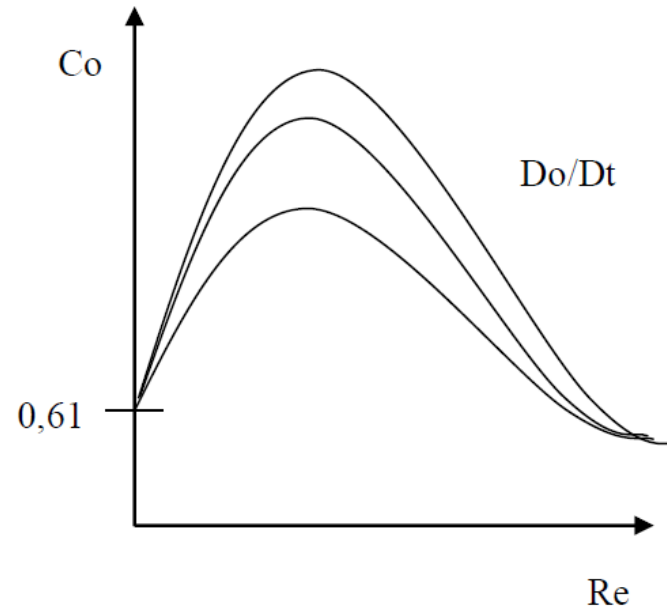


$p/Re > 20.000$

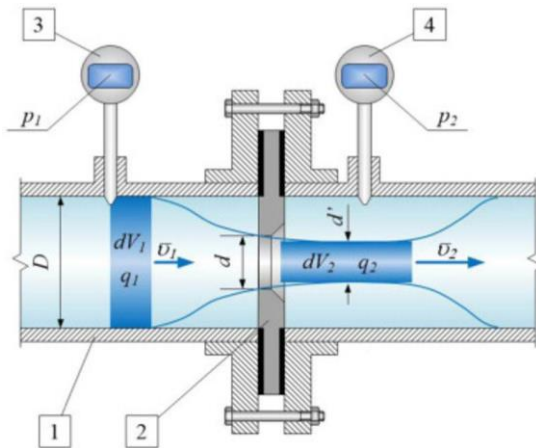
$C_o = 0,61$

$p/Re < 20.000$

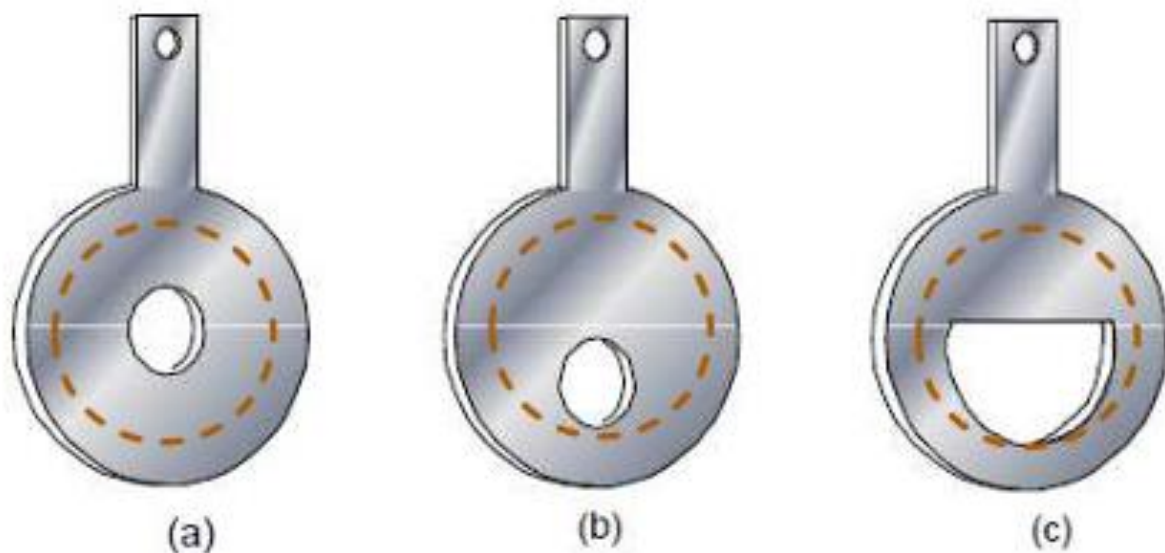
C_o varia com a vazão



Curva de calibração do medidor



Tipos de orifícios:



- a) **Orifício concêntrico:** Orifício concêntrico: Este tipo de placa é utilizado para líquidos, gases e vapor que não contenham sólidos em suspensão.
- b) **Orifício excêntrico:** Utilizada quando tivermos fluido com sólidos em suspensão, os quais possam ser retidos e acumulados na base da placa, sendo o orifício posicionado na parte de baixo do tubo.
- c) **Orifício segmental:** Esta placa tem a 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.

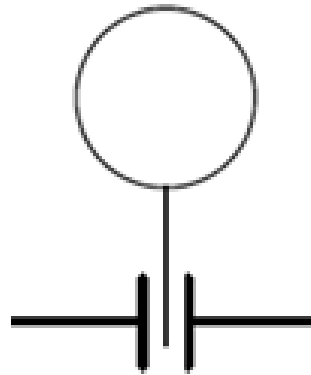
Vantagens

Instalação fácil
Econômica
Construção simples
Manutenção e troca simples.

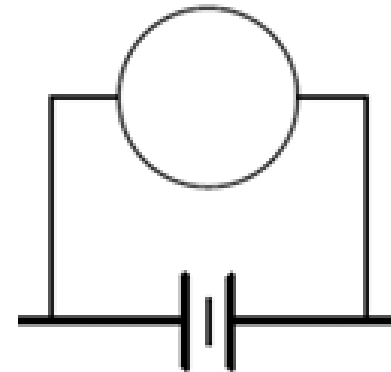
Desvantagens

Alta perda de carga
Baixa Rangeabilidade

Simbologia:



ou



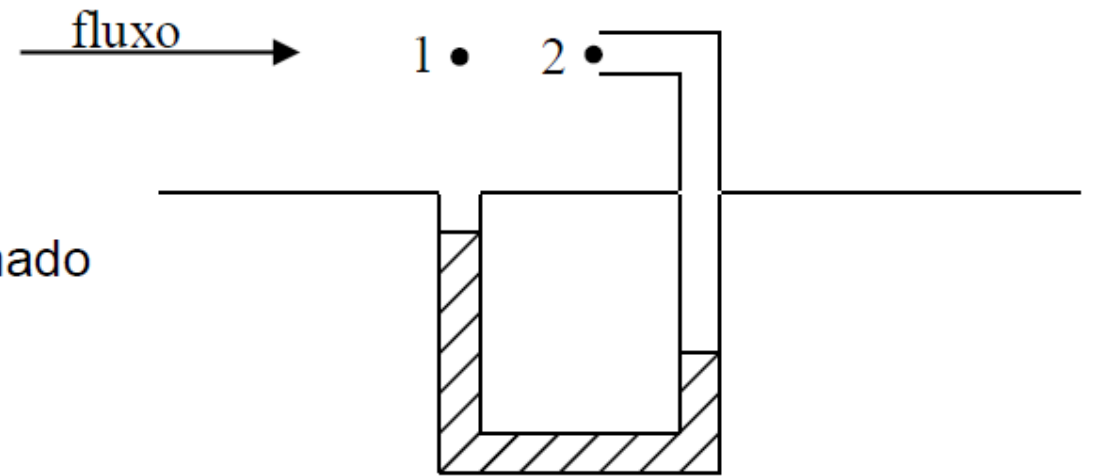
Tubo de Pitot

Bernoulli entre 1 e 2,

$$\frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2 - p_1}{\rho} \quad (*)$$

$v_2 = 0$ fluido estagnado

$$v_1 = C \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad Q = CA \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

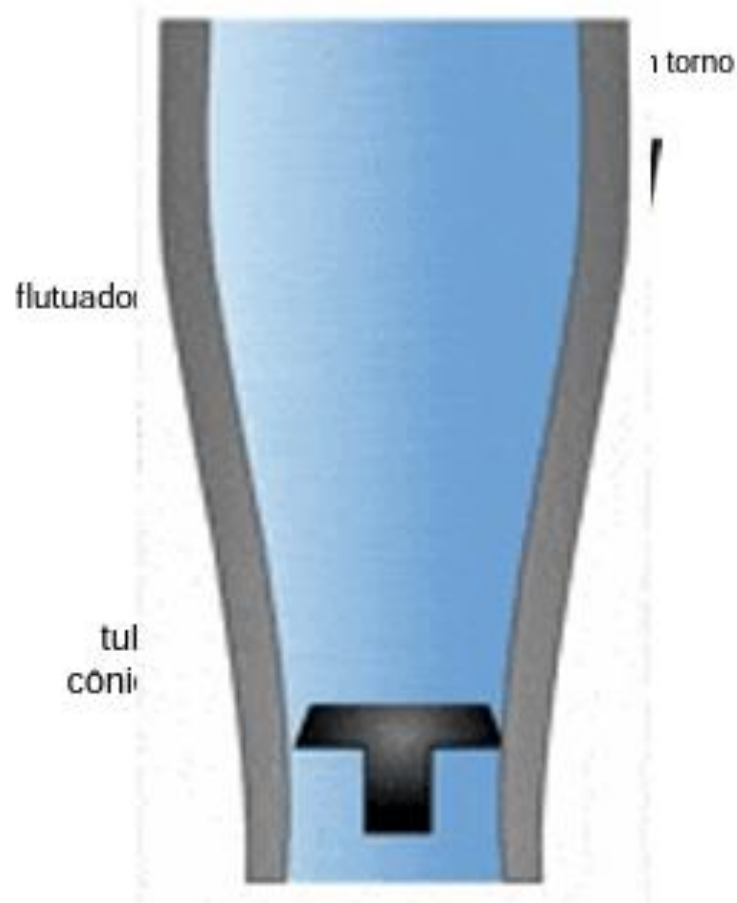


C é um fator que leva em conta os desvios da equação (*).

C ~ 1 para a maioria dos tubos de Pitot, mas para determinações precisas ele deve ser determinado por calibração do Instrumento.

Rotômetros

Rotômetros são medidores de vazão por área variável, nos quais um flutuador varia sua posição dentro de um tubo cônico, proporcionalmente à vazão do fluido.



Simbologia:



Rotômetros

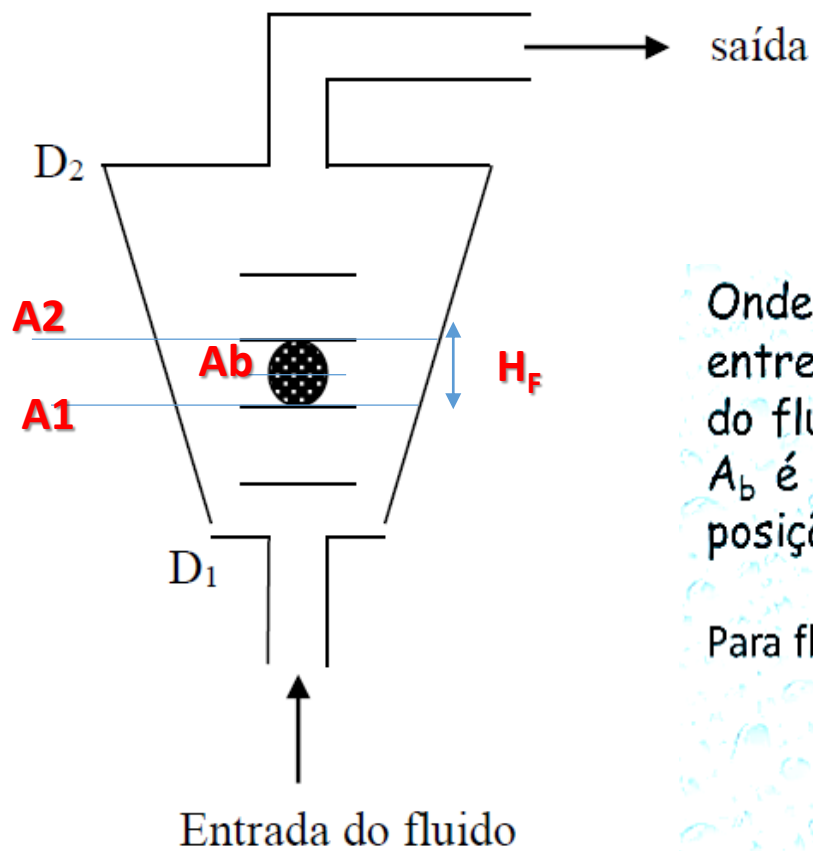
- Fornecem uma relação linear com a vazão e é um dos poucos medidores que não exige trecho reto.
- São muito aplicados para indicação local na área industrial, e em laboratórios.
- Geralmente a instalação é vertical, mas existem modelos próprios para instalação na horizontal.

Basicamente, um rotômetro consiste de duas partes:

- 1) Um tubo de vidro de formato cônico, o qual é colocado verticalmente na tubulação em que passará o fluido que queremos medir. A extremidade maior do tubo cônico ficará voltada para cima.
- 2) No interior do tubo cônico teremos um flutuador que se moverá verticalmente, em função da vazão medida.



Rotômetro



$$Q = C.A_2 \sqrt{\frac{2.V_b(\rho_b - \rho)g}{\rho A_b \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}}$$

Onde: C é um coeficiente que depende da forma do flutuador, A_2 é a área entre o tubo e o flutuador, V_b é o volume do flutuador, ρ_b é a massa específica do flutuador, ρ é a massa específica do fluido, g é a aceleração da gravidade, A_b é a área máxima do flutuador no plano horizontal, A_1 é a área do tubo na posição do flutuador.

Para fluxo de gás: $\rho_f = \frac{p}{R \times T}$ eq.8

$$Q_m \approx \frac{1}{\sqrt{\rho_f}} = \sqrt{\frac{R \times T}{p}} \quad \text{eq.9}$$

Rotâmetro

- Necessidade de observação instantânea da vazão;
- Utilizado para controle de fluxo;
- Trechos em escoamento vertical (possibilidade de instalação direta na tubulação);

Vantagens

- ✓ Construção simples;
- ✓ Facilmente instalados;
- ✓ Não requer alimentação externa;
- ✓ Capacidade flexível;
- ✓ Apresenta boa rangeabilidade (escala linear);
- ✓ Perda de carga pequena e constante.

Desvantagens

- ✗ Faixa de incerteza de medição é relativamente grande, quando comparado a outros medidores;
- ✗ Apresenta apenas a medição no local;
- ✗ Deve estar sempre orientado verticalmente;
- ✗ Necessidade de uma nova calibração para a utilização de fluidos diferentes daquele com o qual o rotâmetro foi calibrado;