DINÂMICA DOS FLUIDOS

– *Regimes de escoamento*

Regime laminar

- Escoamento em baixas velocidades
- Escoamento em camadas
- Não há passagem de moléculas entre camadas
- Movimento ordenado

Regime turbulento

- Escoamento em altas velocidades
- Sem formação de camadas
- Intensa passagem de moléculas entre camadas
- Movimento desordenado

Regime de transição

- Intermediário entre laminar e turbulento

EXPERIÊNCIA DE REYNOLDS

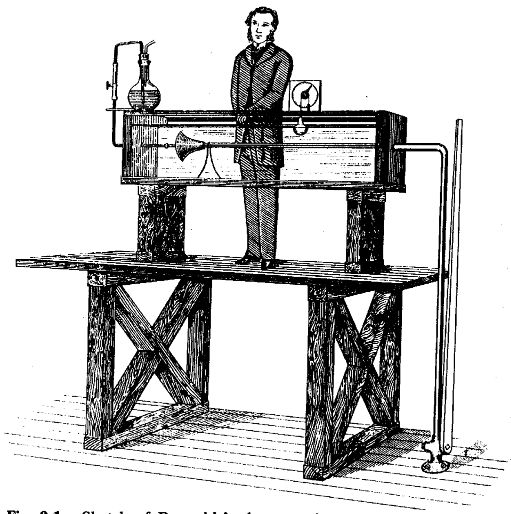


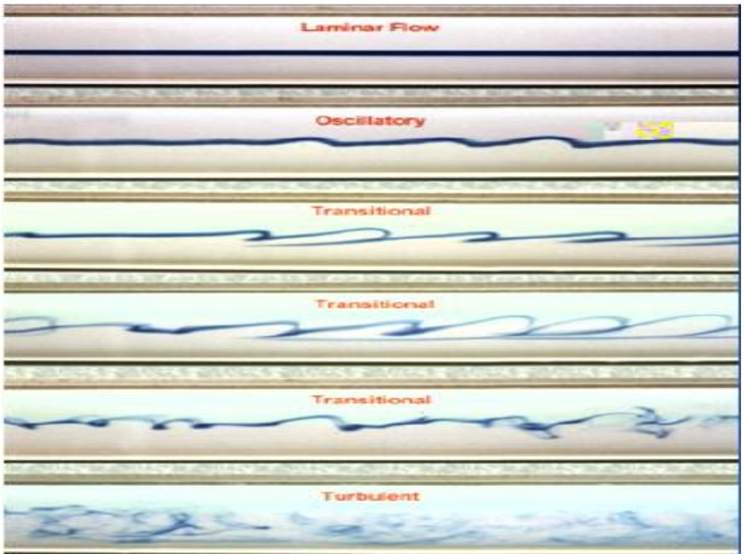
Fig. 9.1. Sketch of Reynolds's dye experiment, taken from his 1883 paper

Osborne **Reynolds**
(1842-1912)

EXPERIMENTO DE REYNOLDS

http://www.youtube.com/watch?v=oApDhs4xtaY

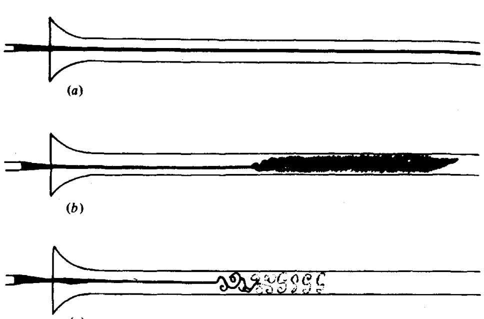
EXPERIMENTO DE REYNOLDS



Observou que as condições escoamento dependem do **diâmetro tubulação**, **densidade**, **viscosidade** e **velocidade escoamento**.

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

Efeito inercial/efeito viscoso



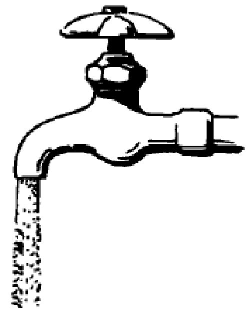
V = baixa (**laminar**)
Re < 2100

V = intermediária
(**transição**) 2100 < Re < 4000

V = alta (**turbulento**)
Re > 4000

http://www.youtube.com/watch?v=p08_KlTKP50&feature=related

(a) Laminar flow



(b) Turbulent flow

A transferência de calor e de massa é maior em que regime de escoamento?

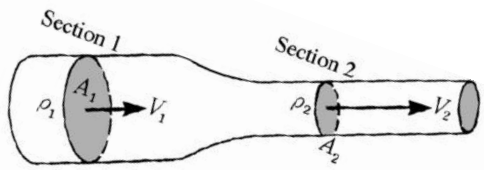
PRINCÍPIOS FÍSICOS QUE REGEM O ESCOAMENTO DE FLUIDOS

- Lei da conservação da massa

- Conservação de Quantidade de movimento – Segunda lei de Newton - (F=m.a)

- Primeira lei da termodinâmica (Conservação da energia)

CONSERVAÇÃO DA MASSA – EQUAÇÃO CONTINUIDADE



$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2$$

PARA FLUIDOS INCOMPRESSÍVEIS:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2}{A_1}$$

TRANSFERÊNCIA DE Q.M.

Q.M. = (m.v)

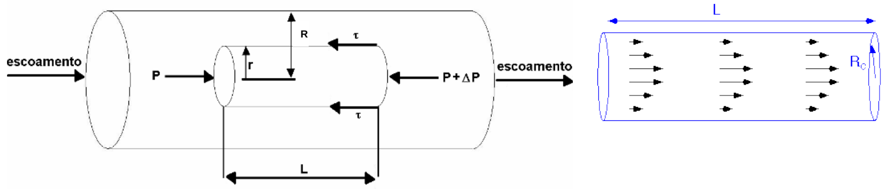
Equação viscosidade Newton:

$\tau = -\mu \cdot \frac{du}{dy}$ > (g).(cm/s)/(cm^2).(s) > Fluxo Q.M.

Fluido Incompressível:

$$\tau = -\mu \cdot \frac{du}{dy} = -\frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{d(u \cdot \rho)}{dy} = -\nu \cdot \frac{d(u \cdot \rho)}{dy}$$

TRANSFERÊNCIA DE Q.M.



$$\sum F = m \cdot a = 0 \ \text{(Regime permanente ou estacionário)}$$

$$\pi \cdot r^2 \cdot \Delta P = -2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \tau$$

$$\therefore \tau = \frac{-\Delta P}{2 \cdot L} \cdot r$$

Nas paredes do tubo :

$$\tau_s = \frac{-\Delta P \cdot R}{4 \cdot L}$$

Para escoamento laminar Fluido Newtoniano

$$\tau = \mu \cdot \left(-\frac{dv}{dr} \right)$$

$$\Rightarrow \frac{-\Delta \text{P}}{2 \cdot \mu \cdot \text{L}} \int_0^r r \cdot dr = -\int_{v_{\max}}^{v} dv$$

$$v = v_{\max} + \frac{\Delta P}{4 \cdot \mu \cdot L} \cdot r^2$$

*S*abendo - se que : $\text{v} = 0$ para $\text{r} = \text{R}$

$$v_{\max} = \frac{-\Delta P}{4 \cdot \mu \cdot L} \cdot R^2$$

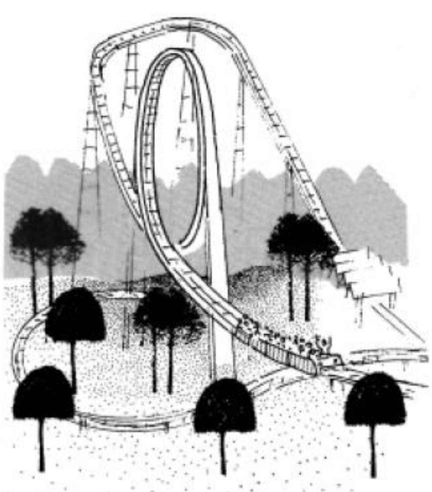
$$\therefore v = \frac{-\Delta P}{4 \cdot \mu \cdot L} \cdot \left(R^2 - r^2\right)$$

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

$$= 2 \cdot \pi \cdot \frac{-\Delta P}{4 \cdot \mu \cdot L} \cdot \int_0^R (R^2 \cdot r - r^3) =$$

$$\Rightarrow Q = \frac{-\pi \cdot \Delta P \cdot R^4}{8 \cdot \mu \cdot L} \quad (\text{Hagen-Poiseuille})$$

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA MECÂNICA



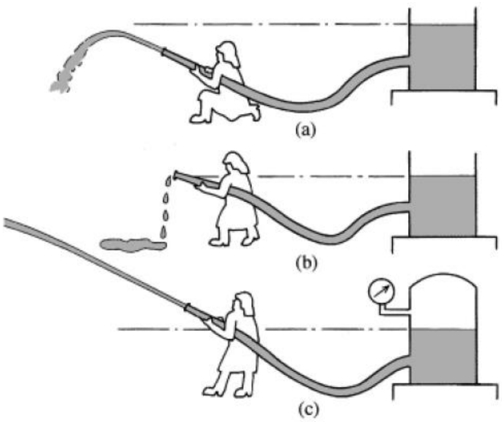
$Ec = m.v^2/2$

$Ep = m.g.h$

P/ sólidos (ignorando atrito):

$Ec + Ep = \text{constante}$

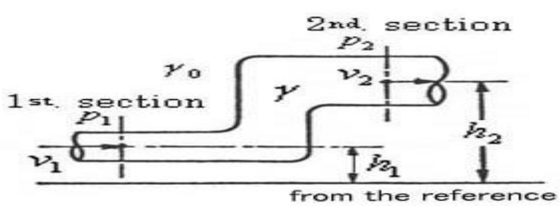
BALANÇO DE ENERGIA MECÂNICA



Para fluidos, ignorando perdas por atríto:

Ep + Ec + Epress = constante

BALANÇO DE ENERGIA MECÂNICA (FLUIDO IDEAL)

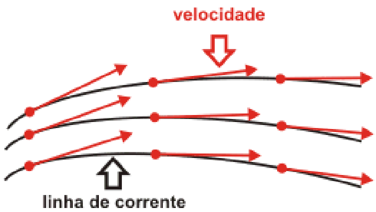


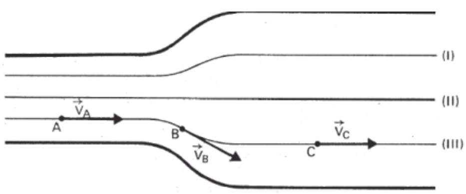
Air flow between two points
following Bernoulli's equation

- **04 hipóteses:**

- 1. **Fluido ideal** - *Escoamento Invíscido (válido para fluidos de baixa viscosidade, ex. água e gases)*,
- 2. **Estado estacionário** (*Perfil de escoamento desenvolvido*, que não se altera com o tempo),
- 3. **Fluidos incompressíveis** (válido para todos os líquidos e para gases escoando a baixas velocidades, de forma que a variação na densidade do gás seja inferior a 5%),
- 4. **Escoamento em linhas de corrente** (Regime laminar).

LINHAS DE CORRENTE:





- Linha de corrente é o trajeto de um elemento de volume do fluido.
- A direção da velocidade do fluido é tangente à linha de corrente.

EQUAÇÃO DE BERNOULLI (*UNIDADE DE MASSA*)

$$\frac{P_1}{\rho} + g \cdot h_1 + \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + g \cdot h_2 + \frac{v_2^2}{2}$$ – Equação de Bernoulli

Dividindo por g:

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + h_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + h_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$$ – Equação de Bernoulli

Unidades de comprimento (L), também denominadas de "cargas"

Expansão equação para fluidos incompressíveis reais (Equação de Engenharia):

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + h_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + H_b = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + h_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + H_T + H_a$$

- Hb = Altura manométrica de Bomba
- HT = Queda de altura Turbina
- Ha = Perdas de carga por atrito ou acidentes no sistema em escoamento.

A perda de carga devido ao atrito por acidentes na tubulação, H_a, pode ser estimada por vários métodos, sendo a equação de Darcy-Weisbach relativamente simples e amplamente utilizada:

$$H_a = f \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \cdot \frac{L}{D}$$

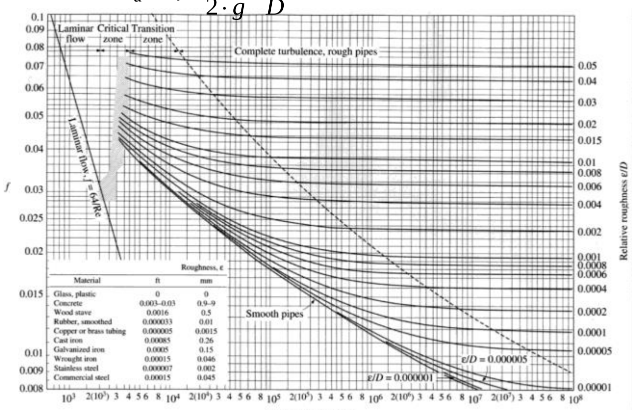


Figura 1. Diagrama de Moody para o fator de fricção de Darcy para escoamento em tubos (***Re***=ρ.v.D/μ).

Sendo
f = fator de atrito de Darcy (adimensional);
L é o comprimento total da tubulação,
D é o diâmetro, e
v a velocidade de escoamento.

Como em toda tubulação existem vários acidentes (curvas, conexões, reduções, válvulas, etc..), um procedimento bastante empregado é a soma de um comprimento (equivalente), para cada tipo de acidente, de forma a se estimar sua contribuição no valor total de Ha; existindo também outras metodologias.

$$L = L_{tub} + \sum L_{eq}$$

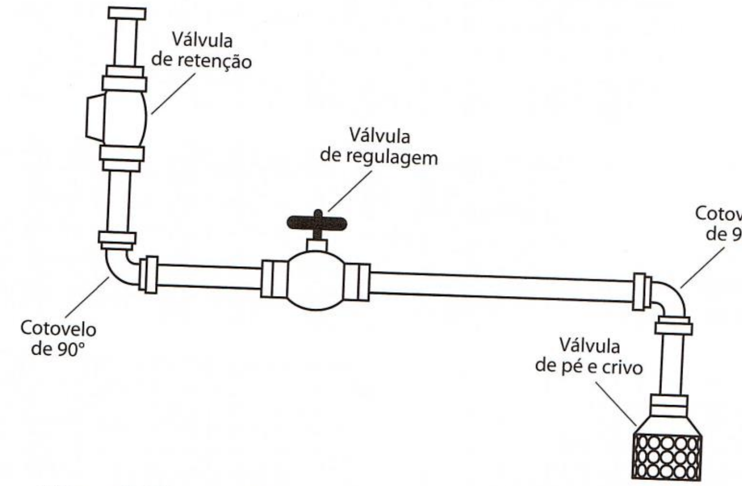
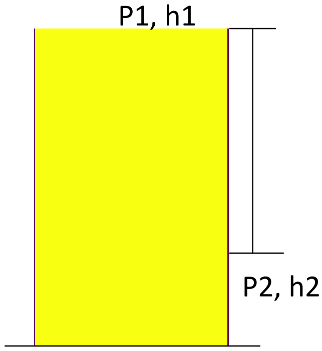


Figura 2.2 Representação de uma tubulação com vários acessórios (baseada em IGNÁCIO, 2011).

APLICAÇÕES DA EQUAÇÃO DE BERNOULLI

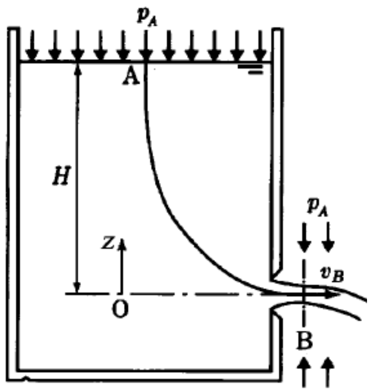
- **Equação da Hidrostática:**



$$\frac{P_1}{\rho} + g \cdot h_1 + \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + g \cdot h_2 + \frac{v_2^2}{2}$$

$$\therefore\ P_2 - P_1 = \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2)$$

➢ Velocidade de descarga em orifício:



$$\frac{P_A}{\rho} + g \cdot H = \frac{P_A}{\rho} + \frac{v_2^2}{2}$$

$$\therefore \; v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

➢ *MEDIDORES DE VAZÃO*

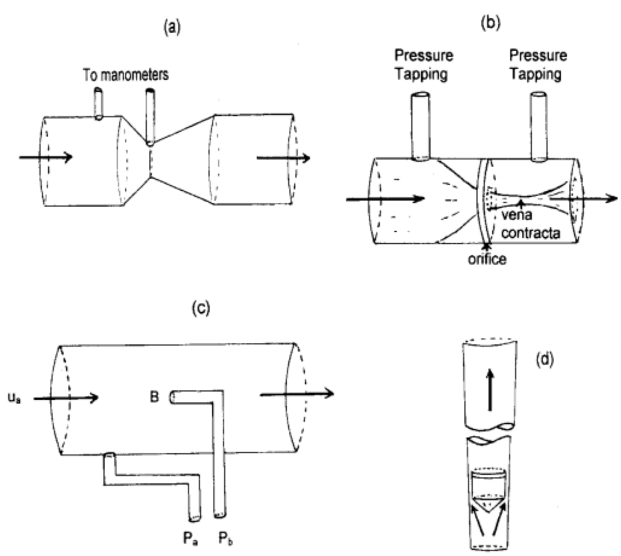


FIGURE 1.7 Flow meters.

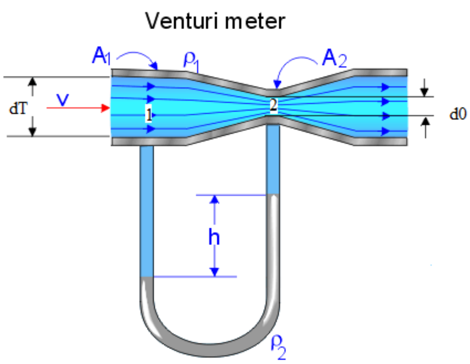
a) Venturi

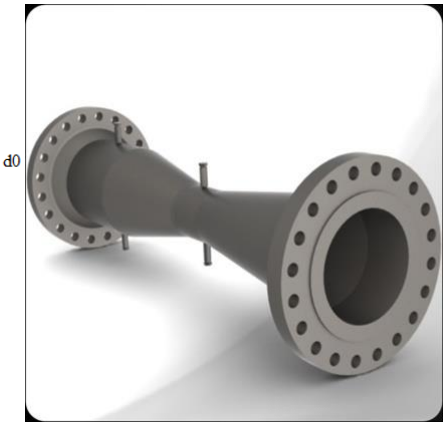
b) Placa de orifício

c) Tubo de Pitot

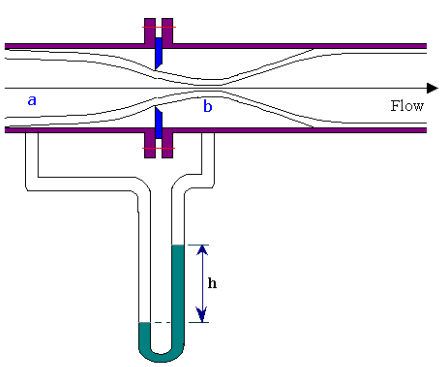
d) Rotâmetro

a) Venturi e placa de orifício:

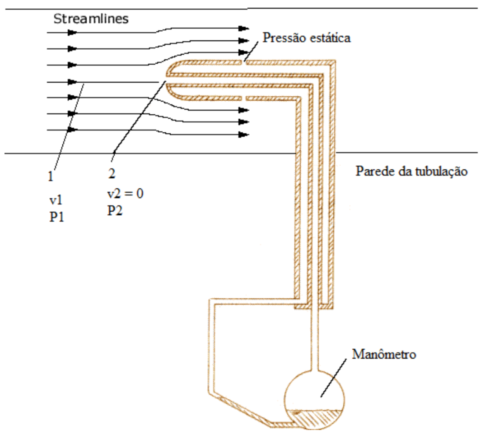




b) Placa de orifício:

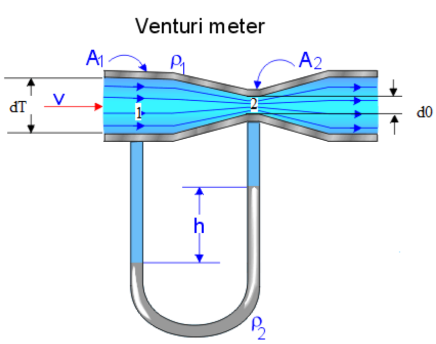


C) TUBO DE PITOT :



MEDIDORES DE VAZÃO

a) Venturi e placa de orifício:



$$\frac{P_1}{\rho}+\frac{v_1^2}{2}+g\cdot Z_1=\frac{P_2}{\rho}+\frac{v_2^2}{2}+g\cdot Z_2$$

$$\frac{P_1-P_2}{\rho}=\frac{v_2^2-v_1^2}{2},\text{ mas } \rho\cdot A_1\cdot v_1=\rho\cdot A_2\cdot v_2$$

$$v_2^2=\frac{2\cdot\Delta P}{\rho\cdot\left[1-\left(A_2/A_1\right)^2\right]},\qquad \beta=d_0/d_T$$

$$v_2=v_0=C_d\cdot\sqrt{\frac{2\cdot\Delta P}{\rho\cdot(1-\beta^4)}}$$

Re no orifício > 10.000 Cd: = 0,98 – Venturi

0,61 – placa orifício

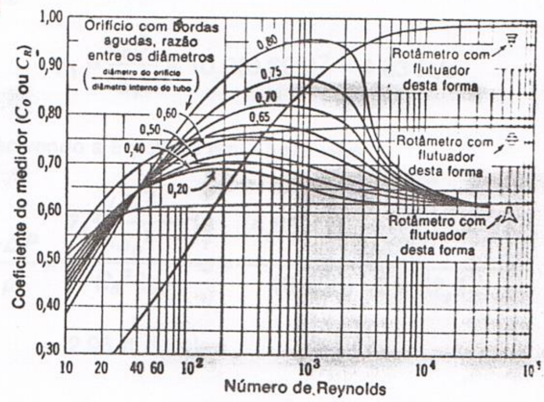


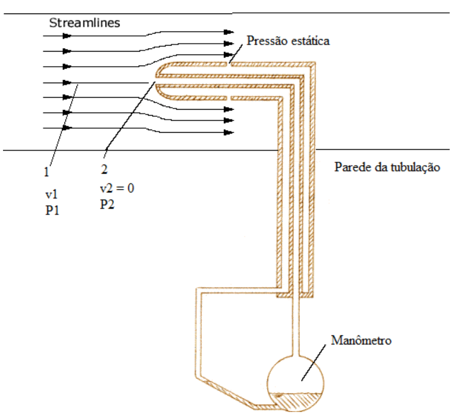
Fig. 20.11 Coeficientes para placas de orifício e rotâmetro (As curvas das placas de orifício têm permissão de publicação de *Instruments*, copirraite © 1973. As curvas de rotâmetros são cortesia da *Fischer and Porter Co.*)

Para as placas de orifício: $N_{Re} = \dfrac{D_o \bar{v}_o \rho}{\mu}$

Re no orifício > 10.000 Cd: = 0,98 – Venturi

0,61 – placa orifício

B) TUBO DE PITOT



$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot \cancel{Z_1} = \frac{P_2}{\rho} + \cancel{\frac{v_2^2}{2}}^{\,0} + g \cdot \cancel{Z_2}$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{v_1^2}{2}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}$$

PT = PE+PD

Medidor primário

Outros Medidores

Rotâmetros:

$$W = C_R \cdot A_2 \sqrt{\frac{2 \cdot V_f \left(\rho_f - \rho\right)\rho}{A_f}}$$

Num fluído com densidade fixa, os termos no interior da raiz são praticamente constantes e não dependem da vazão. Combinando-se estes termos com CR e com Af para fornecer uma nova constante, CR', tem-se que:

$$\bar{v}_1 = C_R' \cdot A_2$$

> Geralmente são fornecidos calibrados pelo fabricante

Outros Medidores

Anemômetros:

FILMES REFERENTES AO ESCOAMENTO DE FLUIDOS

- http://web.mit.edu/fluids/www/Shapiro/ncfmf.html

Sugestões:

- *Flow Visualization*
- *Low Reynolds Number Flow*