UNIPLAN

CENTRO UNIVERSITÁRIO PLANALTO DO DISTRITO FEDERAL

ENGENHARIA CIVIL

APOSTILA

FENÔMENOS DE TRANSPORTE – NP1

DANIEL PETERS GUSMÃO MEIRA

2018

SUMÁRIO

CONTEÚDO PROGRAMÁTICO

- *Cinemática dos Fluidos*: Descrição do movimento de um fluido; aplicações de movimentos de fluidos na engenharia; regimes de movimento: permanente (estacionário) e variado; regimes de escoamento (experimento de Reynolds): laminar e turbulento; tensão de cisalhamento; equação de Reynolds; trajetória e linha de corrente; tubo de corrente; tipos de escoamento: unidimensional e bidimensional.

- *Equação da Continuidade*: Vazão volumétrica; vazão em massa; vazão em peso; relações entre vazão volumétrica, vazão em massa e vazão em peso; equação da continuidade para regime permanente; equação da continuidade para fluido incompressível; equação da continuidade – entradas e saídas não únicas.

- *Equação da Energia*: Equação da energia para regime permanente; formas de energia: energia potencial (de posição e de pressão), cinética e mecânica; equação de Bernoulli; aplicação da equação de Bernoulli: tubo de Venturi e tubo de Pitot; Potência e Rendimento de uma máquina; equação de Bernoulli na presença de uma Máquina.

- *Equação da Energia – Fluido Real:* Equação da energia para fluido real; escoamento não uniforme; equação da energia para entradas e saídas não únicas; definição de perda de carga; equação geral da energia.

OBJETIVOS GERAIS

Fornecer ao aluno de engenharia os fundamentos de Fenômenos de Transporte, capacitando-o a aplicar os princípios básicos e leis físicas que regem o comportamento cinético dos fluidos em escoamento e também para o estudo das diversas disciplinas do curso de Engenharia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estudar os conceitos fundamentais e definição das propriedades de cinemática dos fluidos.

Mostrar aplicações reais de movimentos de fluidos na engenharia.

Elucidar a equação da continuidade para regime permanente propondo aplicações práticas.

Explicar as formas de energia envolvidas no movimento dos fluidos, abarcando a equação da energia, potência e rendimento na presença de uma máquina.

Esclarecer o princípio físico da equação de Bernoulli aplicando-a em sistemas encontrados no dia a dia do engenheiro.

CONTEÚDO PROGRAMÁTICO DAS AVALIAÇÕES

NP1	**Cinemática dos Fluidos; Equação da Continuidade; Equação da Energia.**
NP2	**Equação da Energia – Fluido Real.**
SUBSTITUTIVA	**Cinemática dos Fluidos; Equação da Continuidade; Equação da Energia; Equação da Energia – Fluido Real.**
EXAME	**Cinemática dos Fluidos; Equação da Continuidade; Equação da Energia; Equação da Energia – Fluido Real.**

CARGA HORÁRIA

Carga horária semestral: 60 horas.

Aula	Objetivo	Carga horária (aula)	Material
Cinemática dos Fluidos	Definir conceitos básicos em Física dos Fluidos. Definir de vazão, velocidade e pressão, que serão essenciais na apresentação dos demais conceitos.	**6**	Apostila didática Lista de exercícios Ambiente virtual Simuladores Laboratório
Equação da Continuidade	Estudar os conceitos fundamentais e definição das propriedades de cinemática dos fluidos. Elucidar a equação da continuidade para regime permanente propondo aplicações práticas.	**2**	
Equação da Energia	Explicar as formas de energia envolvidas no movimento dos fluidos, abarcando a equação da energia, potência e rendimento na presença de uma máquina. Esclarecer o princípio físico da equação de Bernoulli aplicando-a em sistemas encontrados no dia a dia do engenheiro.	**6**	
Equação da Energia – Fluido Real	Mostrar aplicações reais de movimentos de fluidos na engenharia.	**8**	

FENÔMENOS DE TRANSPORTE

INTRODUÇÃO

Fenômenos de Transporte é o nome dado á uma das áreas de estudo da Física. O assunto inclui as disciplinas de **Mecânica dos Fluidos** (Momento Linear), **Termodinâmica** (Energia) e **Transporte de Massa**.

A Mecânica dos Fluidos representa o ramo da Mecânica aplicada ao comportamento físico dos fluidos e suas propriedades. É um dos ramos mais complexos da mecânica. A mecânica dos fluidos é o estudo dos fluidos (líquidos ou gases) em movimento e suas interações. A Mecânica dos Fluidos é à base da Engenharia Hidráulica, que englobam a Estática dos Fluidos, a Dinâmica dos Fluidos.

Estática dos Fluidos estuda as condições de equilíbrio dos fluidos, ou seja, nesta situação o fluido se encontra em estado estacionário (repouso) ou em estado de movimento (velocidade constante). Fundamenta-se na **1° Lei de Newton** ($\Sigma\vec{F} = \vec{0}$).

Dinâmica dos Fluidos estuda o comportamento dos fluidos em regime de movimento acelerado no qual se faz presente a ação de forças externas responsáveis pelo transporte de massa. Fundamenta-se na **2° Lei de Newton** ($\Sigma\vec{F} = m \cdot \vec{a}$).

Os Fenômenos de Transporte encontra muita aplicação em diversas áreas da engenharia:
Redes de distribuição de fluidos: água, combustíveis, vapor de água, ventilação em edifícios, ninas e túneis;

- Turbinas: hidráulicas, eólicas, a vapor e gás;
- Compressores, ventiladores e bombas hidráulicas;
- Caldeiras, trocadores de calor, fornalhas, queimadores, motores de combustão interna;
- Aerodinâmica: resistência ao avanço, sustentação de aeronaves, propulsão de aeronaves e de navios;
- Segurança aerodinâmica e conforto – controle de ruído e circulação de ar no interior de veículos;
- Aerodinâmica em estruturas: edifícios, chaminés, estádios, portos, aeroportos;
- Estudos de qualidade de água e de qualidade de ar.

DEFINIÇÃO DE FLUIDO

A matéria se apresenta em três diferentes estados físicos, de acordo com a agregação de partículas: o estado sólido, o estado líquido e o estado gasoso.

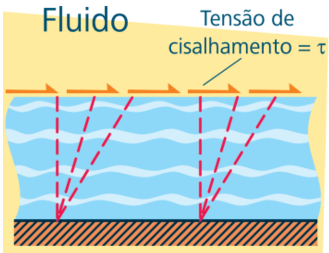
O estado sólido caracteriza-se por conferir a um corpo forma e volume bem definidos.

Os líquidos e os gases, ao contrário dos sólidos, não possuem forma própria: assumem, naturalmente, a forma do recipiente que os contém. Os líquidos têm volume definido, enquanto os gases, por serem expansíveis, ocupam todo o volume do recipiente que o contém. Os líquidos são praticamente incompressíveis enquanto os gases são compressíveis.

Os líquidos e gases têm em comum, graças à facilidade de deformação, a propriedade de poderem se fluir, dando o nome de Fluidos.

Fluido é uma substância capaz de escoar (fluir) continuamente não possui forma própria e que, se em repouso, não resiste à Tensão de Cisalhamento.

O sólido resiste à tensão de cisalhamento aplicada deformando-se, ao passo que o fluido deforma-se continuamente sob a influência da tensão de cisalhamento (um comportamento conhecido como **Escoamento**), não importando quão pequena ela seja. Nos sólidos a tensão é proporcional à taxa de deformação, enquanto o fluido nunca para de deformar-se e a taxa de deformação tende para certo valor.



A grandeza que caracteriza a “resistência à deformação” entre as moléculas de um fluido real é a **Viscosidade**. A viscosidade é a causada por forças coesivas entre as moléculas num líquido e por colisões moleculares nos gases, e varia extremamente com a temperatura. Dizemos que o mel é mais viscoso que a água, pois flui com maior dificuldade que a água.

CLASSIFICAÇÃO DE ESCOAMENTOS DE FLUIDOS

a) **Escoamento Viscoso e não Viscoso**

A **viscosidade** de um fluido é uma medida da resistência que o fluido oferece ao escoamento de uma parte do fluido sobre a outra ou em um tubo, que provoca perda de energia mecânica, a qual é transformada em energia térmica.

Não existe fluido com viscosidade nula e, assim, todo o escoamento dos fluidos envolve efeitos viscosos de algum grau. Os escoamentos em que os efeitos da viscosidade são significativos chamam-se **Escoamentos Viscosos**.

Em muitos escoamentos de interesse práticos, há regiões onde as forças viscosas são desprezivelmente pequenas comparadas às forças inerciais e de pressão. Desprezando os termos viscosos chamam-se de **Escoamento não Viscoso**, sem perda de precisão. Viscosidade é nula, um fluido que escoa sem perdas de energia por atrito.

b) **Escoamento Externo, Interno e de Canal**

O escoamento sem limitação de um fluido sobre uma superfície, uma bola em movimento no ar, é um **Escoamento Externo**. Nos escoamentos externos, os efeitos viscosos estão restritos às camadas-limites próximas das superfícies sólidas e às regiões de esteira a jusante dos corpos.

O escoamento num tubo é um **Escoamento Interno** se o fluido estiver inteiramente limitado por superfícies sólidas. Os escoamentos internos são dominados pela influência da viscosidade em todo o campo do escoamento.

O escoamento num ducto é chamado de **Escoamento de Canal** se o ducto estiver apenas parcialmente cheio com líquido e houver uma superfície livre. Exemplos de escoamento de canal: rios, valas de irrigação, canaletas fluviais.

c) **Escoamento Compressível e Incompressível**

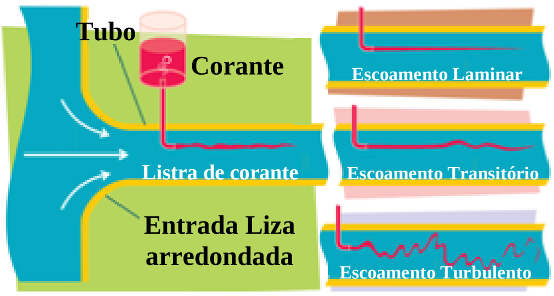
Se a massa específica permanecer aproximadamente constante em todos os lugares é dito ser **escoamento incompressível** ou seu volume não varia ao modificar a pressão. Por exemplo, a massa específica da água muda de 998 kg/m^3 a 1 atm ($\cong$1,0 · 10^5 Pa) para 1003 kg/m^3 a 100 atm, a 20°C, uma mudança de apenas 0,5%. **Uma pequena mudança na densidade da água corresponde a grande mudança de pressão podem ainda ter consequências consideráveis.**

d) **Escoamento Laminar, Turbulento e Transitório.**

O movimento ordenado dos fluidos caracterizado por camadas suaves do fluido é denominado **Escoamento Laminar** (a velocidade do fluido é uniforme). As partículas se deslocam em lâminas individualizadas (linha de corrente), sem trocas de massa entre elas. O escoamento dos fluidos de alta viscosidade como os óleos com baixa velocidade é tipicamente laminar.

O movimento desordenado dos fluidos que ocorre em velocidades altas e é caracterizado por flutuações de velocidade é chamado de **Escoamento Turbulento**.

Um escoamento que se alterna entre laminar e turbulento é chamado de **Escoamento Transitório**.



e) **Escoamento Natural e Forçado**

No **escoamento forçado**, o fluido é obrigado a fluir sobre uma superfície ou num tubo com o uso de meios externos como uma **bomba** ou uma **turbina**. Nos **escoamentos naturais**, qualquer movimento do fluido é devido a meios naturais tal como nos sistemas de aquecimento de água pela energia solar.

f) **Escoamento em Regime Permanente e em Regime Não Permanente**

Escoamento em Regime Permanente é necessário que não haja variação das propriedades (pressão e a velocidade), em nenhum ponto do fluido, em função do tempo. No escoamento permanente a corrente do fluido é dita "estável". As linhas de corrente não se alteram ao longo de tempo.

Escoamento em Regime Não Permanente a velocidade e a pressão num determinado ponto, são variantes com o tempo, variando também de um ponto a outro. A pressão e a velocidade em um ponto são dependentes tanto das coordenadas como também do tempo.

FLUIDOS IDEAIS EM MOVIMENTO

Escoamento de um Fluido em um Tubo

Existem várias camadas que se deslocam com velocidades diferentes, sendo a velocidade igual a zero junto à parede do tubo e máxima na parte central.

O movimento de um fluido real é muito complicado, e ainda não está perfeitamente compreendido. O movimento de um fluido ideal, que é mais fácil de analisar matematicamente.

Nosso **Fluido Ideal** satisfaz quatro requisitos, que estão relacionados ao seu escoamento:

l. Escoamento laminar;
2. Escoamento incompressível;
3. Escoamento não viscoso;
4. Escoamento irrotacional – as partícula se deslocam sem gira em tono seu centro de massa, embora possa girar em torno de qualquer outro eixo.

Dois conceitos significativos para o escoamento dos fluídos são:

a) **Lei da Conservação da Massa (Equação da Continuidade);**

b) **Lei da Conservação da Energia (Equação de Bernoulli);**

PROPRIEDADES DOS FLUIDOS

O fluido é um meio contínuo e homogêneo, de forma que as propriedades médias definidas coincidam com as propriedades nos pontos. Tal hipótese facilita o estudo e permite introduzir definições simples para todas as propriedades dos fluidos.

VAZÃO

A vazão é a relação entre o volume (m^3) e o tempo (s) (representa a rapidez com a qual um volume escoa, em regime permanente através de uma superfície determinada). A vazão pode ser determinada a partir do escoamento de um fluido através de determinada seção transversal de um conduto livre (canal, rio ou tubulação aberta) ou de um conduto forçado (tubulação com pressão positiva ou negativa). O símbolo para a vazão é a letra grega **ϕ** (fi) e a unidade SI é m^3/s.

$$\boldsymbol{\phi = \frac{V}{\Delta t}} \rightarrow \phi = \frac{A \cdot \Delta s}{\Delta t} = \frac{A \cdot v \cdot \Delta t}{\Delta t} \rightarrow \boldsymbol{\phi = Av} \rightarrow \boldsymbol{\phi = \int v \cdot da}$$

$\phi \rightarrow$ vazão (m^3/s)

$V \rightarrow$ volume (m^3)

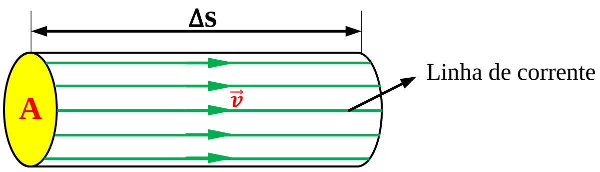
$\Delta t \rightarrow$ variação do tempo (s)

$\Delta s \rightarrow \Delta s = v \cdot \Delta t \rightarrow$ variação do espaço (m)

$v \rightarrow velocidade \left(\frac{m}{s}\right)$

$A \rightarrow$ área (m^2)

$Área\ de\ seção\ transversal\ circular = \pi \cdot r^2 = \pi \frac{d^2}{4}$



Tubo de corrente ou tubo de fluxo

Exemplo: Uma mangueira é conectada em um tanque com capacidade de $3{,}0 \cdot 10^4$ litros. O tempo gasto para esvaziar totalmente o tanque é de 500 minutos em um escoamento permanente. Calcule a vazão volumétrica máxima da mangueira, indique no S.I.

Solução:
$V = 3{,}0 \cdot 10^4$ L = 30 m^3 ∴ $\Delta t = 500$ min. = $3{,}0 \cdot 10^4$ s

$$\phi = \frac{V}{\Delta t} \rightarrow \phi = \frac{30}{3{,}0 \cdot 10^4} \rightarrow \boldsymbol{\phi = 1{,}0 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m^3/s}}$$

VELOCIDADE

O termo velocidade normalmente refere-se à velocidade de escoamento através de uma seção. Ela pode ser determinada dividindo-se a vazão (ϕ) pela área da seção (A) considerada. A velocidade da partícula em cada ponto é sempre tangente à linha de corrente. O símbolo para a velocidade é ***v*** e a unidade SI é m/s.

$$\boldsymbol{\phi = v \cdot A}$$

Exemplo: Vazão 360 L/min. de uma tubulação PVC marrom de 50 mm (diâmetro interno do tubo de 50 mm = 44 mm). Calcule a velocidade, no S.I.

Solução:

$$\phi = 300\,\frac{L}{min} = \boldsymbol{6{,}0 \cdot 10^{-3}\,\frac{m^3}{s}} \ \therefore\ A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \rightarrow A = \pi \cdot \frac{(44 \cdot 10^{-3})^2}{4} \rightarrow \boldsymbol{A = 1{,}5 \cdot 10^{-3}\ m^2}$$

$$\phi = \mathrm{A} \cdot v \rightarrow 60 \cdot 10^{-3} = 1{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot v \rightarrow v = \frac{6{,}0 \cdot 10^{-3}}{1{,}5 \cdot 10^{-3}} \rightarrow \boldsymbol{v = 4{,}0\ m/s}$$

O ruído proveniente de tubulação é gerado quando suas paredes sofrem vibração pela ação do escoamento da água. A norma **ABNT 5626** recomenda que as tubulações sejam dimensionadas de modo que **a velocidade da água não atinja valores superiores a 3,0 m/s** em nenhum trecho da tubulação.

Exemplo: Uma tubulação PVC marrom de 50 mm (diâmetro interno do tubo de 50 mm = 44 mm). Possui uma vazão de 300 L/min. Calcule a velocidade em m/s. A norma ABNT 5626 recomenda que as tubulações sejam dimensionadas de modo que a velocidade da água não atinja valores superiores a 3,0 m/s em nenhum trecho da tubulação.

Solução:
$\Phi = 300$ L/min → $\Phi = 0{,}005$ m^3/s

$$v = \frac{4 \cdot \phi}{\pi \cdot d^2} \rightarrow v = \frac{4 \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot (44 \cdot 10^{-3})^2} \rightarrow \boldsymbol{v = 3{,}3\ m/s}$$

PRESSÃO

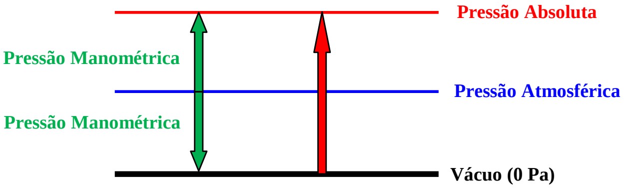
É muito comum confundir pressão com força. A pressão, no entanto, leva em conta não só a força como também a área em que ela atua. Pressão é a razão entre a força (N) e a área (m^2). O símbolo para pressão é P e a unidade SI é Pa (pascal).

$$\boldsymbol{p = \frac{F}{A}}$$

PRESSÃO EM UM FLUIDO

A força aplicada pelos fluidos em repouso ou em movimento é devido à pressão.

A propriedade de pressão do fluido pode ser ainda expressa na forma de Pressões Absolutas e Pressões Manométricas. A Pressão Absoluta é medida tendo como referência a pressão de zero absoluto e é sempre positiva, enquanto a Pressão Manométrica é medida tendo como referência a pressão atmosférica e, assim, podem ser positivas ou negativas.



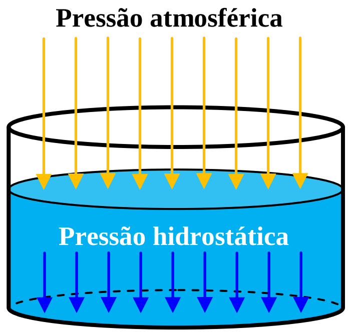
Vácuo é **0 Pa Absoluto**.

Pressão Atmosférica é aproximadamente 101300 Pa **Absolutos**.

Pressão Atmosférica é → **0** Pa **Manométricos**.

Vácuo a Pressão Manométrica→ – 101300 Pa **Manométricos**.

PRESSÃO ABSOLUTA



Pressão absoluta (total) é a pressão exercida por um líquido sobre o fundo de um recipiente mais a pressão atmosférica. A pressão exercida por um líquido (pressão hidrostática) depende da massa específica e da profundidade.

$$\boldsymbol{P = P_{atm} + P_h \rightarrow P = P_{atm} + \rho g h}$$

ρ ⟶ massa específica do fluido manométrico.
P ⟶ pressão absoluta;
Patm ⟶ pressão atmosférica;
g ⟶ aceleração da gravidade;
P_h ⟶ pressão hidrostática (pressão estática - pressão da água quando ela está parada dentro da tubulação);
h ⟶ A altura é também conhecida como altura de carga e pode ser interpretada como a altura de uma coluna de líquido.

Exemplo: A construção de grandes barragens para as usinas hidrelétricas exigem conhecimentos da Hidrostática, como o conceito de pressão exercida por um líquido ou pressão hidrostática. A usina de Itaipu possui uma barragem com aproximadamente 7,0 km de extensão e 196 m de profundidade. Adotando Patm = $1{,}0 \cdot 10^5$ Pa, g = 9,8 m/s^2 e a densidade da água igual a 1,0 g/cm^3, determine, em unidades do S.I.:

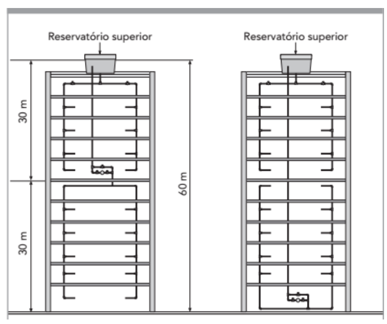
Solução:
a) a pressão hidrostática no fundo da represa.

$$P_h = \rho \cdot g \cdot h \rightarrow P_h = 1{,}0 \cdot 10^3 \cdot 9{,}8 \cdot 196 \rightarrow \boldsymbol{P_h = 1{,}9 \cdot 10^6\ Pa}$$

b) A pressão total no fundo da represa.

$$P_h = P_{atm} + P_h \rightarrow P_h = 1{,}0 \cdot 10^5 + 1{,}9 \cdot 10^6 \rightarrow \boldsymbol{P_h = 2{,}0 \cdot 10^6\ Pa}$$

A medição da pressão é realizada com a utilização de **manômetros**. Os **barômetros** são dispositivos utilizados para medir a pressão atmosférica.



Com relação à **Pressão Hidrostática** (Pressão Estática), a **norma ABNT 5626** diz o seguinte: em uma instalação predial, em qualquer ponto, a **pressão hidroestática máxima** não deve ultrapassar **400 kPa** (40 mca) independente dos materiais dos tubos (PVC, cobre ou ferro) que serão utilizados nas instalações de água fria e quente. Isto significa que a diferença entre a altura do reservatório superior e o ponto mais baixo da instalação predial não deve ser maior que 40 metros.

As tubulações de água fria marrom com junta soldável, a uma temperatura 20°C, possui uma **pressão máxima de 750 kPa** (75 mca).

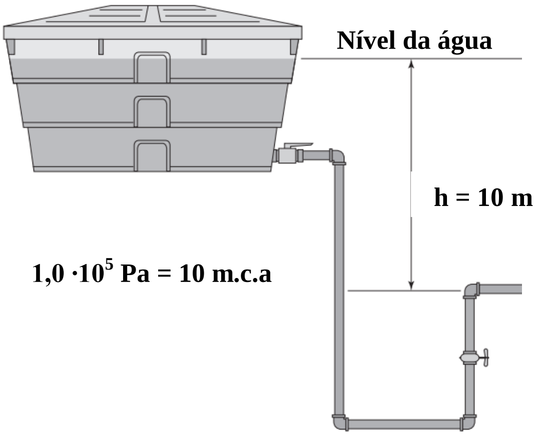
Uma pressão acima desse valor ocasionará ruído, golpe de aríete (acontece quando a água, ao descer com muita velocidade pela canalização, é bruscamente interrompida, ficando os equipamentos e a própria canalização sujeita a choques violentos) e manutenção constante nas instalações. Dessa maneira, devem-se tomar alguns cuidados com edifícios com mais de 40 m de altura, normalmente edifícios com mais de treze pavimentos convencionais (pé-direito de 3 m × 13 = 39 m).

Como, então, projetar uma instalação de água fria em um edifício com mais de 40 metros de altura?

A solução mais utilizada pelos arquitetos e engenheiros, por ocupar menos espaço, é o uso de **válvulas redutoras de pressão** (**VRP**).

A válvula redutora de pressão pode ser instalada a meia altura do prédio ou no subsolo. Além de diminuir a pressão, os redutores otimizam o consumo de água e evitam o desgaste prematuro das instalações hidráulicas.

O valor da pressão hidroestática menos as perdas de cargas distribuídas e localizadas corresponde ao valor da pressão dinâmica.



Com relação à **pressão dinâmica**, de acordo com a norma **ABNT 5626**, em qualquer ponto da rede predial de distribuição, **a pressão da água em regime de escoamento não deve ser inferior a 5,0 kPa** (0,50 mca). A **pressão hidroestática não deve ser inferior a 10 kPa** (1,0 mca), têm exceção. O seu valor é a pressão estática menos as perdas de carga.

Pressão de serviço representa a pressão máxima que podemos aplicar a um tubo, conexão, válvula ou outro dispositivo, quando em uso norma. A norma **NBR5626**: "O fechamento de qualquer peça de utilização não pode provocar **sobrepressão** (**Golpe de Aríete** – principalmente em prédios) em qualquer ponto da instalação a pressão de serviço não deve ultrapassar a ultrapassar **600 kPa** (60 mca).

O que se deve fazer para evitar ou eliminar os Golpes de Aríete?

Utilizar válvulas de fechamento lento.

Cada aparelho sanitário necessita de uma determinada vazão para um perfeito funcionamento. Essas vazões estão relacionadas empiricamente com um número convencionado de peso dos aparelhos. Esses pesos, por sua vez, têm relação direta com os diâmetros mínimos necessários para o funcionamento das peças. Em virtude das tubulações serem dimensionadas como Condutos Forçados, é necessário que fiquem perfeitamente definidos no projeto hidráulico, para cada trecho da canalização, os quatro parâmetros hidráulicos do escoamento: **Vazão**, **Velocidade**, **Pressão** e **Perda de Carga**.

Condutos Forçados: a pressão interna é diferente da pressão atmosférica. Nesse tipo de conduto, as seções transversais são sempre fechadas e o fluido circulante as enche completamente. O movimento pode se efetuar em qualquer sentido do conduto. **Condutos livres**: o fluido apresenta superfície livre, na qual atua a pressão atmosférica. O movimento se faz por gravidade.

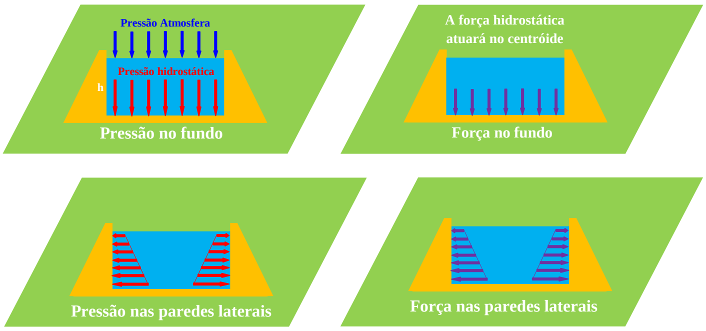
FORÇA HIDROSTÁTICA

Quando uma superfície está submersa em uma massa fluida, forças oriundas do fluido agem sobre esta superfície, mesmo que elas estejam em repouso. O estudo dessas forças é particularmente importante no projeto de grandes tanques de armazenamento de fluidos, navios e represas.

A pressão exercida pela massa fluida em toda a superfície horizontal é constante e a força resultante dessa pressão é conhecida como força hidrostática (F_h) atuará no centro geométrico da superfície, também conhecido de centróide.

Se considerarmos como referência uma superfície plana do fundo de um tanque, a força que atua sobre essa superfície dependerá da pressão sobre a superfície (no fundo) e da sua área, ou seja:

$$\boldsymbol{F_h = P \cdot A = \rho \cdot g \cdot A = \gamma \cdot A}$$



Exemplo: Considere uma piscina olímpica com as seguintes dimensões:
Comprimento: 50 m; Largura: 25 m; Profundidade: 2,0 m; Massa específica da água $\rho = 1{,}0 \cdot 10^3$ kg/m^3; g = 9,8 m/s^2. Determine:

a) Volume da piscina olímpica, em m^3;
b) A pressão exercida exclusivamente pela água no fundo da piscina (pressão hidrostática) vale, em Pa;
c) A força peso da água da piscina vale, em N.

Solução:

a) $V = C \cdot L \cdot h \;\rightarrow\; V = 50 \cdot 25 \cdot 2{,}0 \;\rightarrow\; \boldsymbol{V = 2500\, m^3}\ (\mathbf{2{,}5 \cdot 10^6} \boldsymbol{L})$

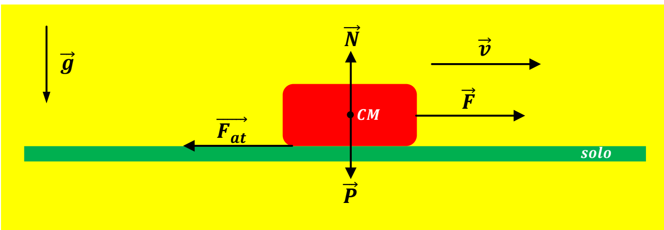
b) $P_h = \rho \cdot g \cdot h \;\rightarrow\; P_h = 1{,}0 \cdot 10^3 \cdot 9{,}8 \cdot 2{,}0 \;\rightarrow\; \boldsymbol{P_h = 1{,}96 \cdot 10^4\, Pa}$

c) $m = \rho \cdot V \;\rightarrow\; m = 1{,}0 \cdot 10^3 \cdot 2500 \;\rightarrow\; \boldsymbol{m = 2{,}5 \cdot 10^6\, kg}$

$F_p = m \cdot g \;\rightarrow\; F_p = 2{,}5 \cdot 10^6 \cdot 9{,}8 \;\rightarrow\; \boldsymbol{F_p = 2{,}45 \cdot 10^7}\ \mathbf{N}$

VISCOSIDADE

Quando dois corpos sólidos em contato se movimentam um em relação ao outro, desenvolve-se uma força de atrito na superfície de contato. A força de atrito é sempre paralela às superfícies em interação e contrária ao movimento relativo entre eles. A intensidade da força de atrito depende do coeficiente de atrito entre os corpos e a força normal.



$\vec{v} \rightarrow$ *velocidade*
$\vec{g} \rightarrow$ *aceleração da gravidade*
$\vec{F} \rightarrow$ *força F*
$\vec{N} \rightarrow$ *força normal*
$\vec{P} \rightarrow$ *força peso*
$\overrightarrow{F_{at}} \rightarrow$ *força de atrito*
$CM \rightarrow$ *centro de massa*

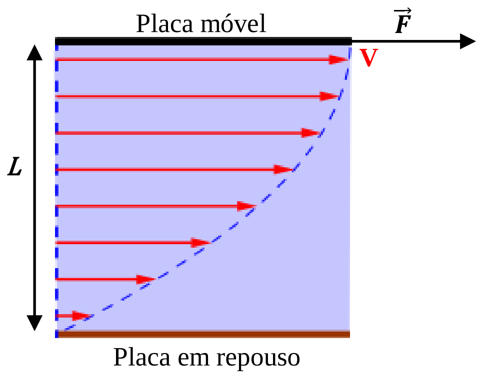
A situação é semelhante quando um fluido se move em relação a um sólido ou quando dois fluidos se movem um em relação ao outro.

A “resistência à deformação” entre as moléculas de um fluido real é a **Viscosidade**. Por exemplo, o mel apresenta uma resistência maior à deformação que a água, dizemos, então, que ele é mais viscoso que água. A viscosidade de um fluido é uma medida da resistência que o fluido oferece ao escoamento de uma parte do fluido sobre a outra ou em um tubo, que provoca perda de energia mecânica, a qual é transformada em energia térmica. Esta resistência provocará uma perda de carga que deverá ser considerada na medição de vazão.

KC-390 EMBRAER

A força que um fluido em movimento exerce sobre um corpo no sentido oposto do escoamento é chamada de **Força de Arrasto**, e sua intensidade depende, em parte, da viscosidade.

A viscosidade não é uma propriedade observável num fluido em repouso. Com o movimento do fluido, porém, ela faz sentir seu efeito, criando as condições para equilibrar a força tangencial externa.



Para obter uma relação entre a **força de arrasto** e a **viscosidade**, considere uma camada fluida entre duas placas paralelas muito grandes separadas por uma distância L. Aplica-se então uma força F constante (força tangencial) na placa superior, paralela a ela enquanto a placa inferior é mantida fixa.

Observa-se que a placa superior se move continuamente sob a influência da força tangencial, após um determinado intervalo de tempo a placa superior passará a desenvolver um movimento uniforme com velocidade v. Isso demonstra, que a força externa F aplicada na placa é equilibrada por forças internas ao fluido (força de arrasto), visto, não existindo aceleração, pela primeira lei de Newton, a resultante das forças deverá ser nula (equilíbrio dinâmico).

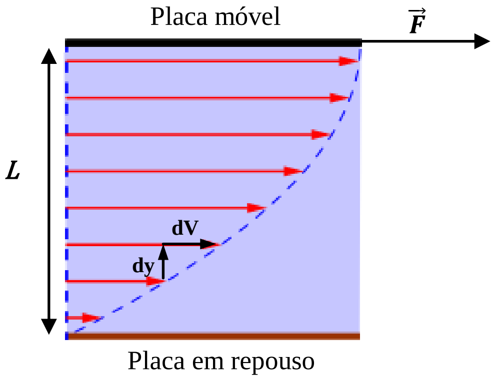
O fluido em contado com a parte superior da placa adere-se à superfície da placa e move-se com ela a mesma velocidade (Princípio da Aderência: os pontos de um fluido, em contato com uma superfície sólida, aderem aos pontos dela, com os quais estão em contato).

O fluido em contato com a placa inferior assume a velocidade daquela placa, que é nula. Observe que cada ínfima camada fluida deforma-se continuamente sob a influência da **Tensão de Cisalhamento**.

A força F dará origem a Tensão de Cisalhamento, que age sobre esta camada fluida é:

$$\boldsymbol{\tau = \frac{F}{A}}$$

Onde F é força de arrasto e A é a área (área de cisalhamento) de contato entre a placa e o fluido. O símbolo para a tensão de cisalhamento é a letra grega $\boldsymbol{\tau}$ (tau) e a unidade SI é N/m^2 ou Pa.



Na figura mostra a determinação da tensão de cisalhamento devido à variação da velocidade que cria um escorregamento entre duas camadas indicadas. **Isaac Newton** descobriu que em muitos fluidos a tensão de cisalhamento é proporcional ao gradiente de velocidade (dV/dy) e dy é a distância vertical. Disto pode-se traduzir a **Lei Newton da Viscosidade**: $\boldsymbol{\tau \propto \frac{dv}{dy}}$ ou $\boldsymbol{\frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} = constante.}$

Os fluidos para os quais o **gradiente de velocidade** é diretamente proporcional à tensão de cisalhamento são chamados de **fluidos newtonianos**, em homenagem **sir Isaac Newton**, que os definiu primeiramente em 1687.

Observa-se que para um deslocamento dy haverá uma correspondente variação dv na velocidade.

$$\boldsymbol{\tau = \mu \frac{dV}{dy}}$$

Sendo **μ** (mi) denominada **Viscosidade Dinâmica** e a unidade SI é **Pa·s**.

Quando a distância L é pequena, pode-se considerar, sem muito erro, que a variação de V com y sejam lineares. Esse fato a simplificações importantes nos problemas, evitando hipóteses e integrações às vezes complicadas.

A **viscosidade dinâmica** é uma grandeza que depende do fluido e das condições sob as quais está submetido, como pressão e temperatura.

Exemplos de fluidos newtonianos: ar, água, gasolina e óleos.

Exemplos de fluidos não newtonianos: sangue, plásticos líquidos; não serão abordados nesta apostila, pois são de pequeno interesse para engenharia, sendo objetos apenas de estudo muito especializados.

Em um escoamento laminar estacionário, a velocidade do fluido entre as placas varia linearmente entre 0 e V. Tal deslizamento entre camadas origina tensões de cisalhamento, que multiplicadas pelas áreas da placa, originam uma força tangencial interna ao fluido (força de arrasto), responsável pelo equilíbrio da força tangencial externa, o que fará com que a placa superior assuma uma velocidade constante.

$$\boldsymbol{\tau = \mu \frac{V}{L} \rightarrow \mu = \frac{\tau \cdot L}{V}}$$

A **viscosidade dinâmica (μ)** é a propriedade dos fluidos que permite equilibrar forças tangenciais externas quando os fluidos estão em movimento. A viscosidade é a propriedade que indica a maior ou a menor dificuldade de o fluido escoar.

A viscosidade dinâmica possui um valor diferente para cada fluido e varia, para um mesmo fluido, principalmente em relação à temperatura.

Os gases e os líquidos comportam-se de maneira diferente quanto a esse aspecto. Nos líquidos, a viscosidade dinâmica diminui com o aumento da temperatura. Isso ocorre porque nos líquidos as moléculas possuem mais energia a temperaturas mais altas e nesse caso podem opor-se mais intensamente às forças intermoleculares coesivas. O resultado é que as moléculas energizadas do líquido movem-se mais livremente.

Enquanto nos gases a viscosidade aumenta com o aumento da temperatura. As forças intermoleculares são desprezíveis e as moléculas em temperatura altas movem-se aleatoriamente (Movimento Browniano – descrito por **Einstein**) a velocidades mais altas. Isso resulta em mais colisões moleculares por unidade de volume e por unidade de tempo e, portanto, em maior resistência ao escoamento.

A viscosidade de um fluido está diretamente relacionada à potência de bombeamento necessária para transportar o fluido num tubo ou mover um corpo através de um fluido (tal como um avião no ar ou um submarino no mar).

A **Força de Arrasto** que atua sobre uma camada de fluido newtoniano é:

$$\boldsymbol{F = \tau A = \mu \frac{V}{L} A}$$

Note que sob condições idênticas, a força F será bem diferente para fluidos diferentes.

A **viscosidade cinemática** (*ν*) e a unidade SI é **m^2/s**, é determinada pela razão entre a viscosidade dinâmica e a massa específica do fluido.

$$\boldsymbol{\nu = \frac{\mu}{\rho}}$$

O nome viscosidade cinemática se deve ao fato da grandeza em questão não envolver nenhuma força, somente comprimento e tempo.

Exemplo: A seguir representa duas placas planas paralelas separadas por uma distância de 0,20 cm, cuja área da placa superior é de 1,5 m^2. Uma das placas é móvel (placa superior) e entre elas tem-se óleo com viscosidade dinâmica de $\mu = 9{,}8 \cdot 10^{-3}$ Pa·s e massa específica $\rho = 0{,}80$ kg/m^3. A plana superior move-se com velocidade constante de 4,0 m/s.

Determine a tensão de cisalhamento e a força que impulsiona a placa, em unidades do S.I.

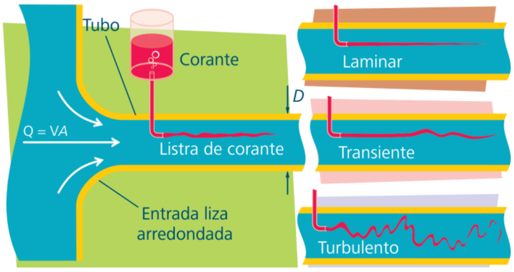
Solução:

$$\tau = \mu \frac{V}{L} \rightarrow \tau = 9{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{4{,}0}{0{,}20 \cdot 10^{-2}} \rightarrow \boldsymbol{\tau = 19{,}6\ N/m^2}$$

$$\tau = \frac{F}{A} \rightarrow 19{,}6 = \frac{F}{1{,}5} \rightarrow \boldsymbol{F = 29{,}4\ N}$$

NÚMERO DE REYNOLDS

Um cientista britânico chamado **Osborne Reynolds** (1842-1912) estudou o regime do escoamento em tubos, superfícies e dutos utilizando um experimento muito simples, nos anos 1880. Em um tubo transparente, Reynolds adaptou uma sonda de corante de forma a introduzir um contraste no escoamento para verificar suas condições. Com esse experimento o cientista verificou que o contraste de corante apresentava comportamentos diferentes, de acordo com as diferentes características do tubo, do fluido e do escoamento.



No primeiro caso, diz-se que o regime de escoamento é **Laminar**, caracterizado por linhas de corrente suaves e movimento altamente ordenado, e é **Turbulento** no terceiro caso, caracterizado pelas flutuações de velocidade e pelo movimento altamente desordenado. O **escoamento de Transição** do escoamento laminar para turbulento.

O escoamento laminar é encontrado quando o fluido altamente viscoso, a baixa velocidade e em pequenos tubos. Para identificar o tipo de escoamento, Reynolds propôs um parâmetro adimensional conhecido como **número de Reynolds** – que relaciona as seguintes propriedades do fluido: **massa específica**, **viscosidade**, **geometria do tubo** e **velocidade média** do escoamento.

O número de Reynolds (**Re**) para tubos é dado pela seguinte relação:

$$\boldsymbol{Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}}$$

$\rho \rightarrow$ massa específica do fluido;
$V \rightarrow$ velocidade do escoamento;
$D \rightarrow$ diâmetro da tubulação;
$\mu \rightarrow$ viscosidade dinâmica do fluido.

Re < 2300 – Escoamento Laminar.
2300 < Re < 4000 – Escoamento de Transição.
Re > 4000 – Escoamento Turbulento.

O número de Reynolds determina a relação entre a energia cinética e o trabalho contra o atrito interno. Número de Reynolds pequeno significa que o trabalho feito contra o atrito predomina e número de Reynolds grande significa que a energia cinética predomina. O fluido ideal, sem viscosidade e sem atrito interno possui número de Reynolds infinito.

Exemplo: Calcular o número de Reynolds e identificar se o escoamento é laminar ou turbulento sabendo-se que em uma tubulação com diâmetro de 4,0 cm escoa água com uma velocidade uniforme de 0,050 m/s. A viscosidade dinâmica da água $\mu = 1{,}0030 \cdot 10^{-3}$ Pa·s e a massa específica da água $\rho = 1{,}0 \cdot 10^{3}$ kg/m^3.

Solução:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \rightarrow Re = \frac{1{,}0 \cdot 10^{3} \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-2} \cdot 4{,}0 \cdot 10^{-2}}{1{,}0030 \cdot 10^{-3}} \rightarrow \boldsymbol{Re = 1994{,}0} \rightarrow \boldsymbol{Escoamento\ Laminar}$$

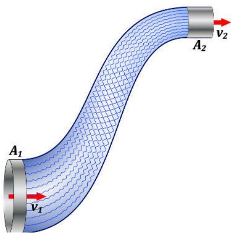
EQUAÇÃO DE CONTINUIDADE

Você já observou que é possível aumentar a velocidade da água que sai de uma mangueira de jardim diminuindo o bico da mangueira. Esta é um exemplo de que a velocidade da água depende da área da seção transversal da mangueira da qual a água escoa.

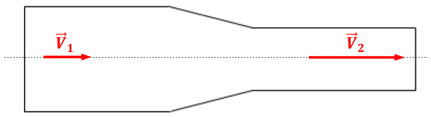
A Equação da Continuidade resulta da Lei da Conservação da Massa aplicada ao movimento do fluido. Para escoamento permanente, a massa de fluido que passa em todas as seções de uma corrente de fluido por unidade de tempo é a mesma. A Equação de Continuidade relaciona a vazão e massa na entrada e na saída de um sistema e também relaciona a área ($\boldsymbol{A}$) e a velocidade ($\boldsymbol{v}$) de um fluido.

$$\mathbf{m_1 = m_2} \rightarrow \boldsymbol{\phi_1 = \phi_2} \rightarrow \mathbf{A_1}\boldsymbol{v_1} = \mathbf{A_2}\boldsymbol{v_2}$$

A equação apresentada mostra que as velocidades são inversamente proporcionais as áreas. Portanto, a velocidade é maior nas seções de menor área.



Exemplo: Para a tubulação mostrada na figura, determine, em unidades do S.I, a velocidade na seção (2) sabendo-se que $A_1 = 10{,}0\ cm^2$ e $A_2 = 5{,}0\ cm^2$. Dados: $\rho = 1{,}0 \cdot 10^3\ kg/m^3$ e $v_1 = 1{,}0\ m/s$.



Solução:

$$\phi_1 = \phi_2 \ \rightarrow \ A_1 v_1 = A_2 v_2 \rightarrow 1{,}0 \cdot 10{,}0 = 5{,}0 \cdot v_2 \ \rightarrow \ \boldsymbol{v_2 = 2{,}0\,\frac{m}{s}}$$

Exemplo: Uma mangueira de jardim conectada a um bocal é usada para encher um balde de 10,0 litros. O diâmetro interno da mangueira é de 2,0 cm, e ele se reduz a 0,80 cm da saída do bocal. São necessários 50 segundos para encher o balde com água, determine, em unidades do S.I, a vazão e a velocidade da água na entrada (v_1) e saída (v_2) do bocal.

Solução:

$V = 10{,}0\ L = 1{,}0 \cdot 10^{-2}\ m^3$

$$\phi = \frac{V}{\Delta t} \rightarrow \phi = \frac{1{,}0 \cdot 10^{-2}}{50} \ \rightarrow \ \boldsymbol{\phi = 2{,}0 \cdot 10^{-4}\ m^3/s}$$

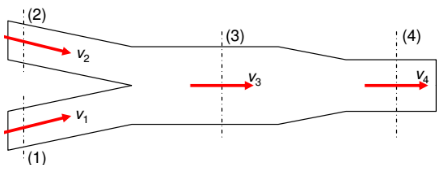
$$\phi = A \cdot v1 \rightarrow \ 2{,}0 \cdot 10^{-4} = \pi \cdot \frac{(2{,}0 \cdot 10^{-2})^2}{4} \cdot v_1 \ \rightarrow \ \boldsymbol{v_1 = \ 0{,}64\ m/s}$$

$$\phi_1 = \phi_2 \ \rightarrow \ A_1 v_1 = A_2 v_2 \rightarrow \pi \cdot \frac{d_1^2}{4} \cdot v_1 = \pi \cdot \frac{d_2^2}{4} \cdot v_2$$

$$(2{,}0 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 0{,}64 = (0{,}80 \cdot 10^{-2})^2 \cdot v_2 \ \rightarrow \ \boldsymbol{v_2 = 4{,}0\,\frac{m}{s}}$$

Exemplo: Para a tubulação abaixo determine, no SI:
Dados: $V_1 = 1{,}00\ m/s$, $V_2 = 2{,}00\ m/s$, $d_1 = 0{,}20\ m$, $d_2 = 0{,}10\ m$, $d_3 = 0{,}25\ m$ e $d_4 = 0{,}15\ m$.

a) A vazão e velocidade no ponto 3;
b) A velocidade no ponto 4.



Solução:

a) $\phi_1 + \phi_2 = \phi_3 \ \rightarrow \ A_1 v_1 + A_2 v_2 = A_3 v_3$

$$\pi \cdot \frac{d_1^2}{4} \cdot v_1 + \pi \cdot \frac{d_2^2}{4} \cdot v_2 = \pi \cdot \frac{d_3^2}{4} \cdot v_3 \ \rightarrow \ d_1^2 \cdot v_1 + d_2^2 \cdot v_2 = d_3^2 \cdot v_3$$

$$(0{,}20)^2 \cdot 1{,}00 + (0{,}10)^2 \cdot 1{,}00 = (0{,}25)^2 \cdot v_3 \rightarrow \boldsymbol{v_3 = 0{,}96\ m/s}$$

b) $\phi_3 = \phi_4 \ \rightarrow \ A_3 v_3 = A_4 v_4 \rightarrow \pi \cdot \frac{d_3^2}{4} \cdot v_3 = \pi \cdot \frac{d_4^2}{4} \cdot v_4$

$$(0{,}25)^2 \cdot 0{,}96 = (0{,}15)^2 \cdot v_4 \ \rightarrow \ \boldsymbol{v_4 = 2{,}67\ \frac{m}{s}}$$

EQUAÇÃO DE BERNOULLI

Equação de **Daniel Bernoulli** (1700 - 1782) descreve o comportamento de um fluido movendo-se em regime permanente incompressível ao longo de uma linha de corrente nas regiões sem viscosidade. Permite transformar as relações de energia em relações entre a variação da pressão, à variação da velocidade e a variação da altura em pontos de uma linha de corrente. Ela é obtida como uma consequência da conservação da energia. Lei da conservação da energia aplicada ao movimento do fluido ideal. A energia mecânica de um fluido em qualquer momento consta de três conceitos:

Energia Cinética ($\boldsymbol{E_c = \frac{m \cdot v^2}{2}}$): é a energia devida à velocidade que possua o fluido.
Energia Potencial Gravitacional (Ep = m·g·h): é a energia devida à altura que um fluido possua.
Energia de fluxo ($\boldsymbol{E_F = P \cdot V}$): é a energia que um fluido contém devido à pressão que possui.
A soma das energias cinética, potencial e de fluxo de uma partícula de fluido é constante ao longo de uma linha de corrente durante um escoamento em regime permanente incompressível e do “atrito” são desprezíveis.
À luz da segunda lei de Newton do movimento, a equação de Bernoulli também pode ser vista como: O trabalho realizado pelas forças de pressão e gravidade sobre a partícula de fluido é igual ao aumento da energia cinética da partícula.
A equação de Bernoulli escrita entre dois pontos quaisquer na mesma linha de corrente como:

$$\boldsymbol{P_1 \cdot V + m \cdot g \cdot h_1 + \frac{m \cdot v_1^2}{2} = P_2 \cdot V + m \cdot g \cdot h_2 + \frac{m \cdot v_2^2}{2}}$$ → **Eq. de Bernoulli associada à Energia.**

Equação da massa específica $\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho} \rightarrow$ substitua o volume V pela razão $\frac{m}{\rho}$ na equação de Bernoulli associada à Energia.

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

$P_1 \cdot \frac{m}{\rho} + m \cdot g \cdot h_1 + \frac{m \cdot v_1^2}{2} = P_2 \cdot \frac{m}{\rho} + m \cdot g \cdot h_2 + \frac{m \cdot v_2^2}{2}$ → (a massa do fluido é mesma) e multiplica por ρ

$$\boldsymbol{P_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = P_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2}}$$ → **Eq. De Bernoulli associada à Pressão.**

A soma das pressões estática, hidrostática e dinâmica é chamado de pressão total. Portanto, a equação de Bernoulli afirma que a pressão total ao longo de uma linha de corrente é constante ao longo de uma linha de corrente durante um escoamento em regime permanente incompressível e do “atrito” são desprezíveis.
Com frequência na engenharia é conveniente representar o nível de energia mecânica usando altura (carga) para facilitar a visualização dos diversos termos da equação de Bernoulli. Isso é feito dividindo cada termo da equação de Bernoulli por g:

$$P_1 \cdot \frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{\rho}} + m \cdot g \cdot h_1 + \frac{m \cdot v_1^2}{2} = P_2 \cdot \frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{\rho}} + m \cdot g \cdot h_2 + \frac{m \cdot v_2^2}{2} \rightarrow \ dividir\ cada\ termo\ por\ \boldsymbol{g}$$

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

$$\gamma = \rho \cdot g$$

$$\boldsymbol{\frac{P_1}{\gamma} + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g}}$$ → **Eq. de Bernoulli associada à carga (altura).**

$H_1 = H_2$ → a carga total é constante.

Assim, equação de Bernoulli pode ser expressa em termos de cargas como: a soma das cargas da pressão, velocidade e elevação ao longo de uma linha de corrente é constante durante um escoamento em regime permanente incompressível e do “atrito” são desprezíveis.

P – Pressão Estática ao longo do conduto – é associada trabalho de fluxo - Energia de Fluxo;

$\mu \cdot g \cdot h$ – Pressão Hidrostática – é associada à elevação do fluido acima de um plano de referência - Energia Potencial Gravitacional;

$\frac{\mu \cdot v^2}{2}$ – Pressão Dinâmica – é associada à velocidade do fluido - Energia Cinética;

$\frac{P}{\gamma}$ – **Carga da Pressão**, ela representa a altura de uma coluna de fluido que produz a pressão estática P;

h – **Carga da elevação**, em relação a um referencial, representa a energia potencial do fluido;

$\frac{v^2}{2g}$ – **Carga da velocidade**, ela representa a elevação necessária para que um fluido atinja a velocidade V durante a queda livre sem atrito;

ρ – massa específica do fluido;

γ – peso específico do fluido;

g – aceleração da gravidade;

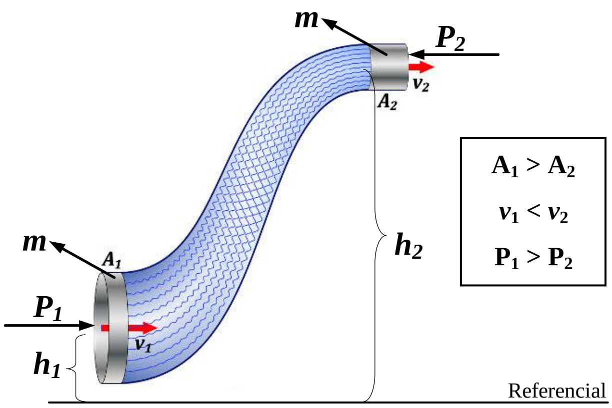
v – velocidade do fluido ao longo do conduto;

m – massa do fluido;

A – área transversal do condutor;

Considere um fluxo contínuo de fluido através de uma tubulação: o volume que atravessa qualquer seção transversal da tubulação, durante certo intervalo de tempo, é o mesmo que atravessa qualquer outra seção da tubulação.

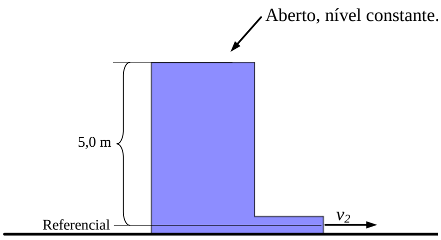
Aplicando a conservação de energia para um fluido, deslocando-se entre os pontos 1 e 2 (ao longo de uma linha de corrente), e desprezando-se as trocas de calor do fluido com o meio externo, tem-se que a soma das energias de pressão (termodinâmica), e mecânica (cinética e potencial) no ponto 1 é igual a soma das energias no ponto 2. Além disso, desprezando-se variações de densidade do fluido ao longo do escoamento (neste caso é chamado de escoamento incompressível), o princípio da conservação da energia pode ser descrito pela Equação de Bernoulli.



Quando a equação de Bernoulli é combinada com a equação da continuidade podem ser utilizadas para determinar as velocidades e pressões em pontos no fluxo conectados por uma linha de corrente. Esta equação está sujeita às seguintes restrições:

Escoamento em regime permanente;
Ausência de atrito;
Escoamento ao longo de uma linha de corrente;
Escoamento incompressível.

Exemplo: O tanque da figura tem grandes dimensões e descarrega água pelo tubo indicado. Considerando o fluido ideal, determinar a vazão em volume de água descarregada, se a seção do tubo é 10,0 cm^2, no SI. Como adotamos a escala efetiva de pressão, as pressões P_1 e P_2 são iguais à pressão atmosférica. Em relação ao plano de referência, temos que: h_1 = 5,0 m e h_2 = 0,0 m. Como o tanque tem grandes dimensões, a velocidade da superfície livre da água pode ser considerada desprezível ou o nível constante. Portanto: V_1 = 0,0 m/s.



Logo, a equação de Bernoulli fica:

Solução:

$$P_1 + \rho g h_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 + \rho g h_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} \rightarrow \textbf{Eq. De Bernoulli associada à Pressão.}$$

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

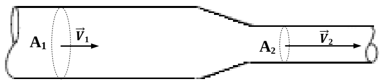
$$\rho g h_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} \rightarrow h_1 = \frac{v_2^2}{2g} \rightarrow \mathbf{v_2} = \sqrt{\mathbf{2gh_1}} \ \textbf{(Equação de Torricelli)}$$

$$v_2 = \sqrt{5 \cdot 2 \cdot 10}$$

$$\mathbf{v_2 = 10,0\ m/s}$$

$$\phi = Av \rightarrow \phi = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot v \rightarrow \phi = \pi \cdot \frac{(10 \cdot 10^{-2})^2}{4} \cdot 10 \rightarrow \boldsymbol{\phi = 7,9 \cdot 10^{-2} m^3/s}$$

Exemplo: A figura mostra uma tubulação disposta horizontalmente, por dentro da qual escoa um fluido ideal de densidade $1,0 \cdot 10^3$ kg/m³. As áreas das seções retas A_1 e A_2 são, respectivamente, $5,0 \cdot 10^{-4}$ m² e $2,5 \cdot 10^{-4}$ m². Sabendo que no ponto 1 a velocidade é 2,0 m/s e a pressão é $5,40 \cdot 10^4$ Pa. Calcule a velocidade e a pressão no ponto 2, no SI.



Solução:

$$\phi_1 = \phi_2 \rightarrow A_1 v_1 = A_2 v_2 \rightarrow \textbf{Equação da continuidade.}$$

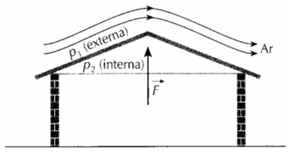
$$5,0 \cdot 10^{-4} \cdot 2,0 = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot v_2 \rightarrow \boldsymbol{v_2 = 4,0 \frac{m}{s}}$$

$$P_1 + \rho g h_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 + \rho g h_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} \rightarrow \textbf{Eq. De Bernoulli associada à Pressão.}$$

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

$$5,40 \cdot 10^4 + \frac{1,0 \cdot 10^3 \cdot (2,0)^2}{2} = P_2 + \frac{1,0 \cdot 10^3 \cdot (4,0)^2}{2} \rightarrow \mathbf{P_2 = 4,8 \cdot 10^4\ Pa}$$

Exemplo: Durante uma forte tempestade, o ar (densidade 1,2 kg/m³) sopra sobre o telhado de uma casa a 72 km/h. A passagem do ar faz com que a pressão na região logo acima do telhado se torne menor do que a pressão do ar abaixo deste. Essa diferença de pressão produz uma força ascensional que pode levantar o telhado, se ele não estiver amarrado à estrutura da casa. Uma solução seria ventilar o espaço sob o telhado para que não haja diferença de pressão.



a) Qual a diferença de pressão entre o interior e o exterior da casa que tende a arrancar o telhado, no SI?

b) Qual o módulo da força devida a esta diferença de pressão sobre o telhado de 100 m², no SI?

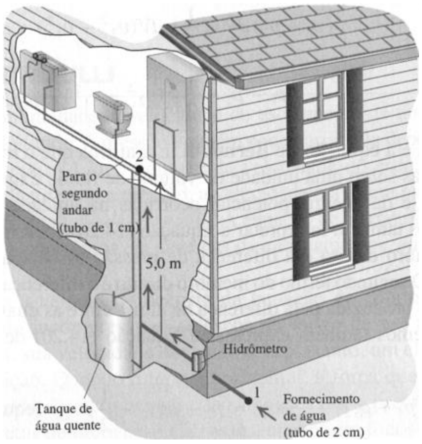
Solução:

a) $P_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} \rightarrow$ **Eq. De Bernoulli associada à Pressão.**

$$P_1 + \frac{1,2 \cdot 0^2}{2} = P_2 + \frac{1,2 \cdot 20^2}{2} \rightarrow P_1 - P_2 = \frac{1,2 \cdot 20^2}{2} \rightarrow \mathbf{\Delta P = 240\ Pa}$$

b) $\Delta P = \frac{F}{A} \rightarrow F = \Delta P \cdot A \rightarrow F = 240 \cdot 100 \rightarrow \mathbf{F = 24000\ N}$

Esta força é equivalente a uma massa de 2,4 toneladas, ou seja, cerca de três carros de passeio.



Exemplo: A água entra em uma casa através de um encanamento com diâmetro interno de 2,0 cm e com uma pressão de $4,0 \cdot 10^5$ Pa. Um encanamento com diâmetro interno de 1,0 cm se liga ao banheiro do segundo andar, que possui um diâmetro interno de 1,0 cm, a 5 m de altura. Sabendo que no cano da entrada a velocidade é igual a 1,5 m/s. Dados: $\rho = 1,0 \cdot 10^3$ kg/m³ e $g = 10$ m/s².

Determine no SI:

a) a velocidade do escoamento;
b) a pressão;
c) a vazão volumétrica no banheiro.

Solução:

a) $\boldsymbol{\phi_1} = \boldsymbol{\phi_2} \rightarrow A_1 v_1 = A_2 v_2 \rightarrow \pi \cdot \frac{d_1^2}{4} \cdot v_1 = \pi \cdot \frac{d_2^2}{4} \cdot v_2$ → **Equação da continuidade.**

$(2{,}0 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 1{,}5 = (1{,}0 \cdot 10^{-2})^2 \cdot v_2 \rightarrow \boldsymbol{v_2 = 6{,}0\,\frac{m}{s}}$

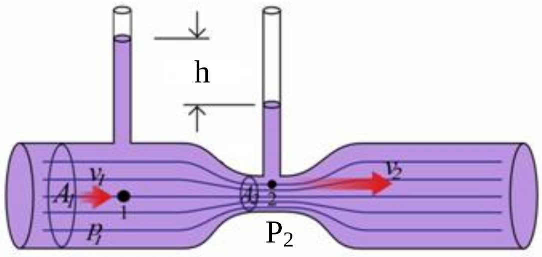
b) $\frac{P_1}{\gamma} + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g}$ → **Eq. De Bernoulli associada à Carga.**

$\frac{4{,}0 \cdot 10^5}{1{,}0 \cdot 10^4} + 0{,}0 + \frac{(1{,}5)^2}{2 \cdot 10} = \frac{P_2}{1{,}0 \cdot 10^4} + 5{,}0 + \frac{(6{,}0)^2}{2 \cdot 10} \rightarrow \mathbf{P_2 = 3{,}3 \cdot 10^5\ Pa}$

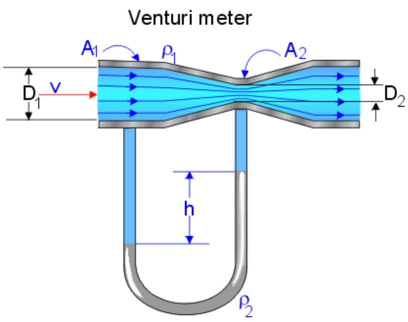
c) $\phi_1 = A_1 v_1 \rightarrow \phi_1 = \pi \cdot \frac{d_1^2}{4} \cdot v_1 \rightarrow \phi_1 = \pi \cdot \frac{(2{,}0 \cdot 10^{-2})^2}{4} \cdot 1{,}5 \rightarrow \phi_1 = \mathbf{4{,}7 \cdot 10^{-4}\ m^3/s}$

EFEITO DE VENTURI

O efeito Venturi (Tubo de Venturi) é usado para medir a velocidade de fluidos. O efeito Venturi ocorre, quando num sistema fechado, o fluido em movimento dentro de uma tubulação (cuja área da seção reta é A_1) com velocidade uniforme v_1 (a qual queremos determinar) comprime-se momentaneamente ao encontrar uma zona de estreitamento (cuja área da seção reta é A_2) diminuindo sua pressão P_2 e consequentemente aumentando sua velocidade v_2, nestes pontos e introduzir uma terceira tubulação, encontrará uma sucção do fluido. Este efeito, demonstrado em 1797, recebe seu nome do físico italiano **Giovanni Battista Venturi** (1746 – 1822).



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/54/Venturifixed2.PNG



Como $A_1 > A_2$, temos $v_1 < v_2$ e $P_1 > P_2$. $P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot h$ (Teorema de Stevin). Pela Equação de Bernoulli temos:

$$\boldsymbol{P_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} \rightarrow P_1 - P_2 = \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} - \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} \rightarrow \Delta P = \frac{\rho}{2} \cdot (v_2^2 - v_1^2)}$$

Mas, pela Equação da Continuidade, temos:

$\mathbf{A_1 \cdot \boldsymbol{v_1} = A_2 \cdot \boldsymbol{v_2}} \rightarrow \boldsymbol{v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2}}$. Substituindo em $\boldsymbol{\Delta P = \frac{\rho}{2} \cdot (v_2^2 - v_1^2)}$

$$\boldsymbol{\Delta P = \frac{\rho}{2} \cdot \left(\left(v_1 \frac{A_1}{A_2} \right)^2 - v_1^2 \right) \rightarrow \Delta P = \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 \cdot \left(\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right) \rightarrow v_1^2 = \frac{2\Delta P}{\rho \left(\frac{A_1{}^2}{A_2{}^2} - 1 \right)} \rightarrow v_1^2 = \frac{2\Delta P}{\rho \left(\frac{A_1{}^2 - A_2{}^2}{A_2{}^2} \right)}}$$

$\boldsymbol{v_1^2 = A_2^2 \cdot \frac{2\Delta P}{\rho (A_1{}^2 - A_2{}^2)}}$ Usando a igualdade $\boldsymbol{\Delta P} = \boldsymbol{\rho \cdot g \cdot h}$ (**Teorema de Stevin**) $\boldsymbol{v_1^2 = A_2^2 \cdot \frac{2\rho \cdot g \cdot h}{\rho (A_1{}^2 - A_2{}^2)}}$

$$\boldsymbol{v_1 = A_2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h}{A_1{}^2 - A_2{}^2}}}$$

Exemplo: Um tubo Venturi é inserido numa canalização provocando um desnível de 0,60 m. Um líquido de massa específica igual a 1,2 x 10³ kg/m³ atravessa a canalização cuja seção de entrada tem área de 10,0 cm² e a seção do estrangulamento tem área de 5,0 cm². Adotando g = 9,8 m/s².
Calcule:

a) Velocidade de entrada;

b) Velocidade na seção do estrangulamento;

c) A vazão do líquido através da canalização.

Solução:

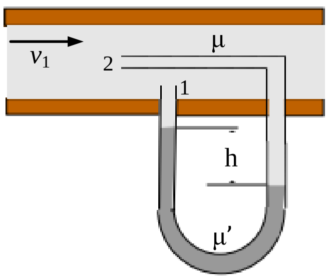
a) $v_1 = A_2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h}{{A_1}^2 - {A_2}^2}} \rightarrow v_1 = 5{,}0 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{2 \cdot 9{,}8 \cdot 0{,}60}{(10{,}0 \cdot 10^{-4})^2 - (5{,}0 \cdot 10^{-4})^2}} \rightarrow \boldsymbol{v_1 = 2{,}0\ \mathrm{m/s}}$

b) $\mathrm{A}_1 \cdot v_1 = \mathrm{A}_2 \cdot v_2 \rightarrow 10{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot 2{,}0 = 5{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot v_2 \rightarrow \boldsymbol{v_2 = 4{,}0\ \mathrm{m/s}}$

c) $\phi = A \cdot v \rightarrow \phi = 10{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot 2{,}0 \rightarrow \boldsymbol{\phi = 2{,}0 \cdot 10^{-3} \mathrm{m^3/s}}$

TUBO DE PITOT

O Tubo de Pitot é outro instrumento usado para medir a velocidade de fluidos. Foi demonstrado em 1732. Deve o seu nome ao físico e engenheiro francês do século XVIII **Henri Pitot** (1695 – 1771). A região na cor escura representa um líquido de massa específica **ρ’ > ρ**, denominado líquido manométrico.



http://www.ugr.es/~jtorres/t7.pdf

http://fenomenosdaengenharia.blogspot.com.br/2013/06/o-tubo-de-pitot-e-aviacao_6.html

Pela Equação de Bernoulli temos:

$$\boldsymbol{P_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2}} \rightarrow \mathrm{v2} = 0 \rightarrow \boldsymbol{P_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = P_2 \rightarrow P_2 - P_1 = \frac{\rho \cdot v_1^2}{2}}$$

Usando o mesmo raciocínio desenvolvido para o Tubo de Venturi, obtemos: ΔP = (ρ’ – ρ)·g·h.

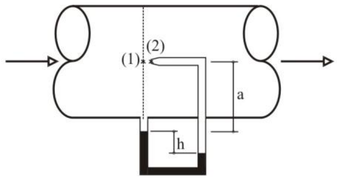
Comparando as equações: $\frac{\rho \cdot v_1^2}{2}$ = (ρ’ – ρ)·g·h

$$\boldsymbol{v_1 = \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho) \cdot g \cdot h}{\rho}}}$$

Se o fluido um **gás**, teremos ρ’ >> ρ, onde ρ’ – ρ ≅ ρ’. Assim, ΔP = ρ’·g·h

$$\boldsymbol{v_1 = \sqrt{\frac{2\rho' \cdot g \cdot h}{\rho}}}$$

Exemplo: Um tubo de Pitot é inserido num escoamento conforme ilustrado. O fluido é água, e o líquido do manômetro é mercúrio. Determinar a velocidade do escoamento. Dados: g = 9,8 m/s^2; h = 0,050 m; $\mu_{água}$= 1,0·10^3 kg/m^3 e μmercúrio= 13,3·10^3 kg/m^3.

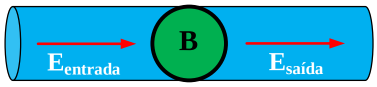


Solução:

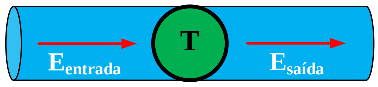
$$v_1 = \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho)\cdot g\cdot h}{\rho}} \rightarrow v_1 = \sqrt{\frac{2(13{,}3\cdot 10^3 - 1{,}0\cdot 10^3)\cdot 9{,}8\cdot 0{,}050}{1{,}0\cdot 10^3}} \rightarrow \boldsymbol{v_1 = 3{,}5\ m/s}$$

EQUAÇÃO DE BERNOULLI NA PRESENÇA DE UMA MÁQUINA

Existem duas categorias de máquinas de fluido, Bombas e Turbinas. A bomba é uma máquina que adiciona energia a um fluido. O fluido na saída de uma bomba sofre aumento de energia, em geral na forma de aumento de pressão. A turbina é uma máquina que retira energia a um fluido. O fluido na saída de uma turbina sofre perda de energia, em geral na forma de redução de pressão.



$E_{entrada} < E_{saída}$



$E_{entrada} > E_{saída}$

A água sempre fluirá naturalmente de uma condição de energia maior para outra de energia menor. Como é possível fazer a água fluir para uma condição de energia maior?

Obviamente fornecendo energia à água. É isso que uma bomba faz: converte a energia mecânica que recebe do motor e fornecer à água. O propósito da bomba em um sistema de elevação de fluido é proporcionar-lhe energia para aumentar a sua energia potencial, ou seja, movimentá-lo de um nível de energia potencial baixo para um nível de energia potencial alto.

Uma pessoa comum pode pensar que a energia fornecida para uma bomba aumenta a velocidade do fluido passando através da bomba, e que uma turbina extrai energia do fluido deixando-o mais lendo. Nem sempre é assim. Consideremos condições de regime permanente. Com isso queremos dizer quem nem a vazão nem a velocidade de rotação das pás da bomba se modificam com o tempo. Pela conservação de massa, se o escoamento é incompressível, as vazões na entrada e na saída devem ser iguais. Além disso, se o diâmetro da saída for igual àquele da entrada, a conservação de massa exige que a velocidade através da saída deve ser idêntica à velocidade através da entrada. A velocidade de saída pode até ser menor do que a velocidade de entrada se o diâmetro da saída for maior do que aquele da entrada.

$$\boldsymbol{\phi_E = \phi_S \ \therefore\ D_E = D_S \ \therefore\ V_E = V_S \ \therefore\ P_E < P_S \ \rightarrow \text{Bomba}}$$

$$\boldsymbol{\phi_E = \phi_S \ \therefore\ D_E = D_S \ \therefore\ V_E = V_S \ \therefore\ P_E > P_S \ \rightarrow \text{Turbina}}$$

A finalidade de uma bomba é adicionar energia a um fluido, resultando em um aumento da pressão do fluido, não necessariamente em um aumento da velocidade do fluido através da bomba.

Analogamente podemos dizer com relação à finalidade de uma turbina:

A finalidade de uma turbina é extrair energia a um fluido, resultando em uma diminuição da pressão do fluido, não necessariamente em uma diminuição da velocidade do fluido através da turbina.

POTÊNCIA FORNECIDA AO FLUÍDO PELA BOMBA

A potência recebida pelo fluido (potência útil – P_B) ao passar pela bomba será:

$$P_B = H_B \cdot \frac{Vol}{\Delta t} \cdot \rho \cdot g \rightarrow P_B = H_B \cdot \phi \cdot \gamma$$

$H_B \rightarrow$ carga da elevação;
$\Phi \rightarrow$ vazão;
$\gamma \rightarrow$ peso específico;

Note que uma altura multiplicada por um peso específico é uma realização de trabalho, que dividido pelo tempo resulta na potência empregada.

A **pressão mínima** ($\boldsymbol{p_{mín}}$) que a bomba deve fornecer para realizar bombeamento $\boldsymbol{p_{mín} = \gamma \cdot H_B}$.

$$\boldsymbol{P_B = \phi \cdot p_{mín}}$$

POTÊNCIA CEDIDA PELO FLUÍDO PARA TURBINA

A Potência cedida pelo fluido (P_T) ao passar pela turbina será: $P_T = \boldsymbol{H_T \cdot \frac{V}{\Delta t} \cdot \rho \cdot g} \rightarrow \boldsymbol{P_T = H_T \cdot \phi \cdot \gamma}$

RENDIMENTO DA BOMBA E DA TURBINA

P é definido como a potência total da bomba, ou a potência disponível no eixo da bomba. $P > P_B$. Define-se rendimento da bomba (η_B) como sendo a razão entre a potência útil (potência recebida pelo fluido) e a potência total (potência fornecida pelo eixo da bomba):

$$\boldsymbol{\eta_B = \frac{P_B}{P} \rightarrow P = \frac{H_B \cdot \phi \cdot \gamma}{\eta_B}}$$

P é definido como potência total da turbina, ou a potência disponível no eixo da turbina. $P < P_T$. Define-se rendimento da turbina (η_T) como sendo a razão entre a potência total (potência fornecida pelo eixo da turbina) e a potência total (potência cedida pelo fluido ao passar pela turbina):

$$\boldsymbol{\eta_T = \frac{P}{P_T} \rightarrow P = H_T \cdot \phi \cdot \gamma \cdot \eta_T}$$

BERNOULLI ASSOCIADA À CARGA NA PRESENÇA DE UMA MÁQUINA

O desempenho de uma bomba é caracterizado pela sua carga manométrica H_B, definida como a variação da carga de Bernoulli entre a entrada e a saída da bomba.

Carga da Bomba $\rightarrow \boldsymbol{H_B} = \left(\frac{P_2}{\gamma} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g}\right)_S - \left(\frac{P_1}{\gamma} + h_1 - \mathrm{H_L} + \frac{v_1^2}{2g}\right)_E \rightarrow \boldsymbol{H_B = H_2 - H_1} \rightarrow \boldsymbol{H_B} > 0$

Carga da Turbina $\rightarrow \boldsymbol{H_T} = \left(\frac{P_2}{\gamma} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g}\right)_S - \left(\frac{P_1}{\gamma} + h_1 - \mathrm{H_L} + \frac{v_1^2}{2g}\right)_E \rightarrow \boldsymbol{H_T = H_2 - H_1} \rightarrow \boldsymbol{H_T} < 0$

A carga líquida é proporcional à potência útil (potência do fluido) realmente fornecida ao fluido.

$\boldsymbol{H_B}$ e $\boldsymbol{H_T}$ representam alturas de carga adicionadas ou subtraídas do volume de controle por uma bomba, uma turbina e $\boldsymbol{H_L}$ perdas de carga oriundas de atrito viscoso.

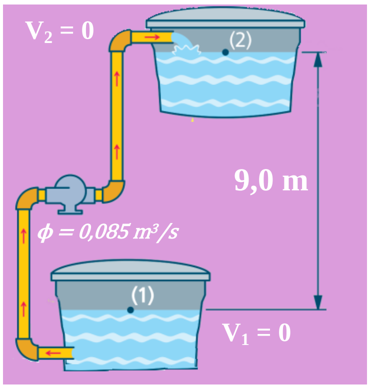
Um fluido, ao escoar, transforma parte de sua energia em calor. Essa energia não é mais recuperada na forma de energia cinética e/ou potencial e, por isso, denomina-se **perda de carga.**

$\boldsymbol{\frac{P_1}{\gamma} + h_1 + H_B - H_T - \mathrm{H_L} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g}}$ → **Eq. de Bernoulli associada à carga na presença de uma máquina.**

A equação deve ser escrita no sentido do escoamento.

$\frac{P}{\gamma}$ – **Carga da Pressão**, ela representa a altura de uma coluna de fluido que produz a pressão estática P;
h – Carga da Elevação, em relação a um referencial, representa a energia potencial do fluido;
$\frac{v^2}{2g}$ – **Carga da Velocidade**, ela representa a elevação necessária para que um fluido atinja a velocidade V durante a queda livre sem atrito;
$\boldsymbol{H_B}$ – **Carga da Bomba**, energia adicionada (carga adicionada) pela bomba ao fluido;
$\boldsymbol{H_T}$ – **Carga da Turbina**, energia extraída (carga extraída) pela turbina ao fluido;
$\boldsymbol{H_L}$ – **Carga da Pendida**, energia perdida (carga perdida) devido ao atrito;

Exemplo: O propósito da bomba em um sistema de elevação de fluido é proporcionar-lhe energia para aumentar a sua energia potencial, ou seja, movimentá-lo de um nível de energia potencial baixo para um nível de energia potencial alto. De acordo com o esquema da Figura, a água deve ser bombeada de um reservatório para outro com um nível de elevação de 9,0 m entre as suas superfícies livres. As perdas por atrito viscoso na tubulação impõem uma perda de carga nesse processo equivalente a uma altura de 4,26 m. A vazão da bomba é de ϕ = 0,085 m^3/s. Por simplificação, considera-se que o escoamento é permanente, incompressível. A pressão sobre as superfícies livres dos reservatórios é a pressão atmosférica, e a velocidade do fluido nas superfícies dos reservatórios é nula. Determine:



a) a altura à qual o fluido precisa ser elevado por uma bomba;

b) a pressão mínima que a bomba deve fornecer para realizar este bombeamento (pressão da saída da bomba), considerando $\gamma_{água} = 9800\ N/m^3$;

c) potência da bomba se o rendimento é 75%;

Solução:

a) $\frac{P_1}{\gamma} + h_1 + H_B - H_T - H_L + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \rightarrow h_1 + H_B - H_L = h_2$

$H_B = (h_2 - h_1) + H_L \rightarrow H_B = 9,0 + 4,26 \rightarrow \boldsymbol{H_B = 13,26\ m}$

b) $P_B = \gamma \cdot H_B \rightarrow P_B = 9800 \cdot 13,26 \rightarrow \mathbf{P_B = 129948\ Pa}$

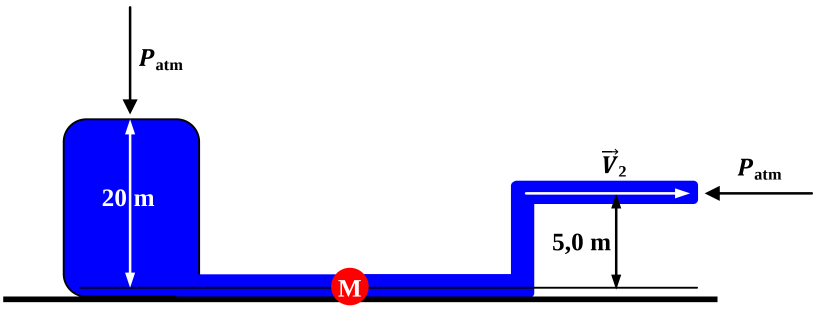
c) $P_B = \frac{\phi \cdot \gamma \cdot HB}{\eta_B} \rightarrow P_B = \frac{0,085 \cdot 9800 \cdot 13,26}{0,75} \rightarrow \mathbf{P_B = 14727,4\ W}$

Exemplo: O reservatório de grandes dimensões da figura descarrega água para a atmosfera através de uma tubulação cuja área da seção transversal A = 10,0 cm^2 e com uma vazão de ϕ = 10,0 L/s. As perdas por atrito viscoso na tubulação impõem uma perda de carga nesse processo equivalente a uma altura de 2,10 m Dados: g = 9,8 m/s^2 e ρ = 1000 kg/m^3.

a) Determine a velocidade V_2;

b) Verificar se a máquina instalada é bomba ou turbina;

c) Determinar sua potência se o rendimento é 75%.



Solução:

a) $\phi = A \cdot V \rightarrow 10 \cdot 10^{-3} = 10 \cdot 10^{-4} \cdot V \rightarrow \boldsymbol{V = 10\ m/s}$

b) $\frac{P_1}{\gamma} + h_1 + H_B - H_T - H_L + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g}$

$h_1 + H_M - H_L = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \rightarrow H_M = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} - h_1 + H_T + H_L \rightarrow H_M = 5,0 + \frac{10^2}{2 \cdot 9,8} - 20,0 + 2,10$

$\boldsymbol{H_M = -7,8\ m} \rightarrow$ é **uma Turbina**

c) $P_T = \phi \cdot \gamma \cdot H_T \cdot \eta_B \rightarrow P_B = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 9800 \cdot 7,8 \cdot 0,75 \rightarrow \mathbf{P_B = 573,3\ W}$

EXERCÍCIOS

PROPRIEDADE DOS FLUIDOS

1) O concreto pesado é obtido através da utilização de agregados com maior massa específica aparente em sua composição, como por exemplo, a hematita, a magnetita e a barita. Sua dosagem deve proporcionar que a massa específica varia entre 2800 a 4500 kg/m³, oferecendo à mistura boas características mecânicas, de durabilidade e capacidade de proteção contra radiações. Este concreto tem sua aplicação mais frequente na construção de câmaras de raios-X, reatores nucleares, contrapesos, bases e lastros. Considerando a massa específica máxima do concreto pesado. Determine a massa do bloco de concreto que ocupa um volume de 2,5 m³, em unidades no SI.

2) Uma mangueira é conectada em um tanque com capacidade de 30.000 litros. O tempo gasto para esvaziar totalmente o tanque é de 100 minutos. Calcule a vazão da mangueira.

3) Calcular o volume de um reservatório, em metros cúbicos, sabendo-se que a vazão de escoamento de um líquido é igual a 5 L/s. Para encher o reservatório totalmente são necessárias 2 horas.

4) Calcule a vazão de um fluido que escoa por uma tubulação com uma velocidade média de 3,0 m/s, sabendo-se que o diâmetro interno da seção da tubulação é igual a 5,0 cm. E determine também o intervalo de tempo necessário para encher uma piscina de 25,0 m de comprimento, 10,0 m de largura e 2,0 m de profundidade.

5) Calcular a vazão de um fluido que escoa por uma tubulação com uma velocidade média de 1,4 m/s, sabendo-se que o diâmetro interno da seção da tubulação é igual a 6,0 cm.

6) Calcular o tempo que levará para encher um tambor de 214 litros, sabendo-se que a velocidade de escoamento do líquido é de 0,30 m/s e o diâmetro do tubo conectado ao tambor é igual a 30,0 mm.

7) Calcular o diâmetro, em milímetros, de uma tubulação, sabendo-se que pela mesma, escoa água a uma velocidade de 2,0 m/s. A tubulação está conectada a um tanque com volume de 10800 litros e leva uma hora para enchê-lo totalmente.

8) Uma tubulação PVC marrom de 50 mm (diâmetro interno do tubo de 50 mm = 44 mm). Possui uma vazão de 600 L/min. Calcule a velocidade em m/s. A ABNT 5626 recomenda que as tubulações sejam dimensionadas de modo que a velocidade da água não atinja valores superiores a 3,0 m/s em nenhum trecho da tubulação.

9) Por um cano cujo raio interno r = 1,00 cm, flui um líquido, de modo que por uma seção reta passam 720 litros por hora. Qual a velocidade do líquido, no S.I.

10) Um conduto de 0,10 m de diâmetro tem uma descarga de 6,00 L/s. Qual a velocidade média de escoamento?

11) Uma força de intensidade 2,0 N é aplicada perpendicularmente a uma superfície através de um pino cilíndrico de 1,0 cm^2 de área da base, que está em contato com a superfície. Determine a pressão em unidades do S.I., exercida pelo pino sobre a superfície.

12) Um cubo homogêneo e maciço, feito de material de massa específica 4,0 g/cm^3, tem sua aresta medindo 20,0 cm. Considerando g = 9,8 m/s^2, determine a pressão que o cubo exerce sobre o plano em que se apoia.

13) Considerando $P_{atm} = 1{,}0 \cdot 10^5$ Pa, g = 9,8 m/s^2 e densidade da água igual a 1,0 g/cm³, determine a pressão total, em pascal, no fundo de um lago de 15,0 m de profundidade

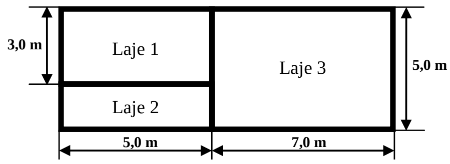
14) Um tambor cilíndrico, cheio de gasolina, cuja densidade é 0,70 g/cm^3, possui área da base de 0,75 m^2 e altura de 200 cm. Sendo g = 9,8 m/s^2, determine:

- **a)** a massa de gasolina contida no tambor:
- **b)** a pressão exercida, pela gasolina, no fundo do tambor:

15) A construção de grandes barragens para as usinas hidrelétricas exigem conhecimentos da Hidrostática, como o conceito de pressão hidrostática. A usina de Itaipu possui uma barragem com aproximadamente 7,0 km de extensão e 196 m de profundidade. Adotando $P_{atm} = 1{,}0 \cdot 10^5$ Pa, g = 9,8 m/s^2 e a densidade da água igual a 1,0 g/cm^3, determine, em unidades do S.I.: a pressão total no fundo da represa.

16) Um grande aquário de 5,00 m de altura está cheio de água doce até altura de 2,00 m. Uma das paredes do aquário é feita de plástico e tem 8,00 m de largura. Adotando $P_{atm} = 1{,}0 \cdot 10^5$ Pa, g = 9,8 m/s^2 e a densidade da água igual a 1,0 g/cm^3. De quanto aumenta a força exercida sobre o fundo do aquário é aumentada para 4,00 m?

17) Lajes são elementos planos, em geral horizontais. A principal função das lajes é receber os carregamentos atuantes no andar, provenientes do uso da construção (pessoas, móveis, equipamentos e veículos), e transferi-los para os apoios. As lajes maciças de concreto são projetadas para construções de grande porte, como escolas, indústrias, hospitais, pontes de grandes vãos, etc. Considere o croqui abaixo, cuja espessura das lajes é de 10,0 cm e que representa apenas uma unidade. Para a obra serão utilizados: Caminhão betoneira balão com capacidade de transportar 15,0 m^3 de concreto; Bomba de concreto com vazão de $1{,}00 \cdot 10^5$ L/h, que bombeia até 60,0 m de altura a uma distância de 150,0 m na horizontal. Devido a fluidez do concreto, o transporte é feito através de uma tubulação de 12,70 cm de diâmetro.



Concreto de massa específica de 2500,0 kg/m^3 (ABNT 6120).

Baseado nestes dados determine:

a) a vazão da bomba de concreto em m^3/s.

b) o volume total de concreto utilizado na execução da obra mostrada no croqui, em m^3.

c) a velocidade do fluido (concreto), em m/s.

d) o peso específico da laje maciça considere $g = 9{,}8$ m/s^2.

18) A seguir representa duas placas planas paralelas separadas por uma distância de 0,10 cm, cuja área da placa superior é de 3,00 m^2. Uma das placas é móvel (placa superior) e entre elas tem-se óleo com viscosidade dinâmica de $9{,}80 \cdot 10^{-3}$ N·s/m^2. A plana superior move-se com velocidade constante de 2,00 m/s. Determine a tensão de cisalhamento e a força que impulsiona a placa, em unidades do S.I.

19) Calcular o número de Reynolds e identificar se o escoamento é laminar, transição ou turbulento sabendo-se que em uma tubulação com diâmetro de 5,0 cm escoa água com uma velocidade uniforme de 0,060 m/s. A viscosidade da água $\mu = 1{,}0030 \cdot 10^{-3}$ N·s/m^2 e a massa específica da água $\rho = 1{,}0 \cdot 10^3$ kg/m^3.

20) Calcular o número de Reynolds e identificar se o escoamento é laminar, transição ou turbulento. O fluido apresenta viscosidade $\mu = 0{,}20$ N·s/m^2, densidade igual 850 kg/m^3 escoando em um tubo de 44 mm de diâmetro interno. A velocidade média é 3,0 m/s.

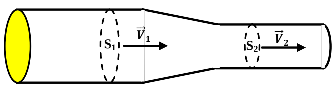
21) Sabendo que o escoamento de um fluido (água) é turbulento (Re = 5000). A viscosidade da água $\mu = 1{,}0030 \cdot 10^{-3}$ N·s/m^2 e a massa específica da água $\rho = 1{,}00 \cdot 10^3$ kg/m^3, escoando em um tubo de 2,50 cm de diâmetro interno. Calcule a velocidade média.

22) Sabendo que o escoamento de um fluido (água) é turbulento (Re = 5785). A viscosidade da água $\mu = 1{,}0030 \cdot 10^{-3}$ N·s/m^2 e a massa específica da água $\rho = 1{,}00 \cdot 10^3$ kg/m^3, escoando em um tubo de 5,00 cm de diâmetro interno. Calcule a velocidade média.

23) Calcular o número de Reynolds e identificar se o escoamento é laminar, transição ou turbulento, sabendo-se que uma tubulação com 2,0 cm de diâmetro escoa água a uma velocidade de 0,22 m/s, a massa específica da água $\rho = 1{,}00 \cdot 10^3$ kg/m^3 e a viscosidade da água $\mu = 1{,}0030 \cdot 10^{-3}$ N·s/m^2.

EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

24) A figura representa duas seções transversais, S_1 e S_2, de uma tubulação através da qual escoa um fluido ideal. As áreas de S_1 e S_2 são, respectivamente, iguais a 40,0 cm^2 e 30,0 cm^2. Sabendo que em S_1 a velocidade do fluido é 6,0 m/s, Calcule a velocidade em S_2.

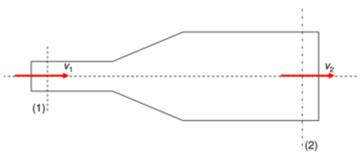


25) Uma mangueira de diâmetro interno de 2,00 cm e usada para encher um balde de 18,00 litros.

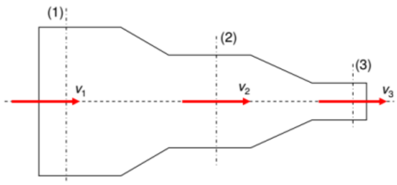
a) Se leva 1,00 minuto para encher o balde. Qual é a velocidade com que a água passa pela mangueira?

b) Foi colocado na extremidade de saída um redutor com um diâmetro de 5,00 mm. Qual é a velocidade com que a água sai da mangueira?

26) Água escoa na tubulação mostrada com velocidade de 2,0 m/s na seção (1). Sabendo-se que a área da seção (2) é o dobro da área da seção (1), determine a velocidade do escoamento na seção (2).

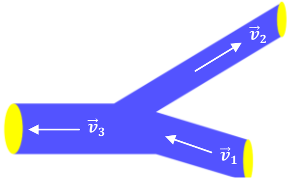


27) Determine a velocidade do fluido nas seções (2) e (3) da tubulação mostrada na figura. Dados: $v_1 = 3{,}0$ m/s, $d_1 = 0{,}50$ m, $d_2 = 0{,}30$ m e $d_3 = 0{,}20$ m



28) Considere um fluido ideal escoando pelas tubulações, conforme a figura a seguir. Determine a vazão e a velocidade em cada tubo se: o tubo 1 tem um diâmetro de 50 mm e velocidade de 2,0 m/s; o tubo 2 tem diâmetro de 40 mm e escoa 30% do total da vazão e o tubo 3 tem um diâmetro de 60 mm.

29) Uma piscina possui 4,0 m de largura, 10,0 m de comprimento e 1,8 m de profundidade. Para enchê-la completamente, utilizando um condutor de área de seção transversal 25 cm^2, são necessárias 8 horas.

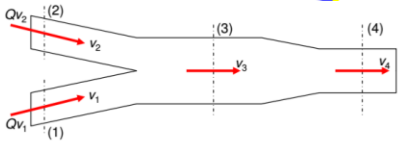


a) Qual é a vazão de água através do condutor?

b) Qual é a velocidade com que a água sai do condutor?

c) Com que velocidade sobe o nível de água da piscina?

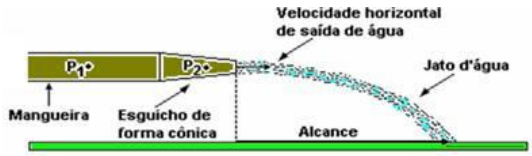
30) Dados: v_1 = 1,0 m/s, v_2 = 2,0 m/s, d_1 = 0,20 m, d_2 = 0,10 m, d_3 = 0,25 m e d_4 = 0,15 m.



a) A vazão e a velocidade no ponto (3).

b) A velocidade no ponto (4).

31) Um dos métodos utilizados pelos jardineiros, durante a irrigação de plantas, é diminuir a secção transversal da mangueira por onde sai a água para que o jato de água tenha um maior alcance. Geralmente isso é feito através de esguichos. A figura a seguir mostra a extremidade de uma mangueira de secção transversal uniforme e na horizontal, conectada a um esguicho de forma cônica. A mangueira está sendo alimentada por um reservatório de água com nível constante e aberta. O jato de água sai na extremidade do esguicho com velocidade horizontal. Considere que as superfícies internas da mangueira e do esguicho não ofereçam resistência ao escoamento e que a água seja um fluido ideal. Com relação ao escoamento da água nessa extremidade da mangueira e no esguicho, é correto afirmar:



a) Se, de alguma maneira, for impedida a saída de água pelo esguicho (tampar a saída), a pressão aumentará em todos os pontos.

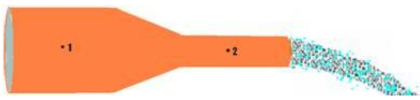
b) O alcance do jato de água é maior quando se usa o esguicho, porque a menor secção transversal na saída do esguicho faz aumentar a vazão do jato de água.

c) A pressão, no ponto P_2 (onde a secção transversal é menor), é maior que a pressão no ponto P_1 (onde a secção transversal é maior).

d) A pressão, na saída do esguicho, é igual à pressão no nível superior do reservatório.

e) A trajetória das partículas de água que saem do esguicho é parabólica quando se despreza a resistência do ar.

32) A figura representa uma tubulação horizontal em que escoa um fluido ideal. A velocidade de escoamento do fluido no ponto 1, em relação à velocidade verificada no ponto 2, e a pressão no ponto 1, em relação à pressão no ponto 2, são:

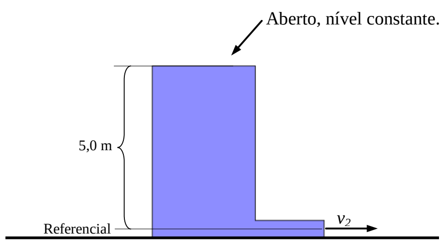


a) maior, maior. **b)** maior, menor. **c)** menor, maior. **d)** menor, maior. **e)** menor, menor.

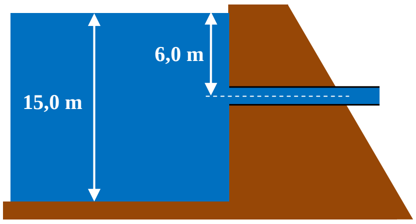
EQUAÇÃO DE BERNOULLI

33) Determine a velocidade do jato de líquido na saída do reservatório de grandes dimensões mostrado na figura.

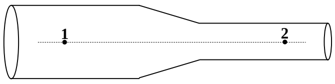
Dados: $\rho_{água}$ = 1.000 kg/m³ e g = 9,8 m/s².



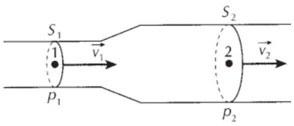
34) Na figura, a água doce atrás de uma represa tem uma profundidade 15,0 m. Um cano horizontal de 4,0 cm de diâmetro atravessa a represa a uma profundidade 6,0 m. Qual o volume de água que sai do cano em 3,0 horas?
Dados: $\rho_{água}$ = 1.000 kg/m³ e g = 9,8 m/s².



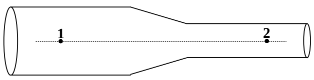
35) As superfícies S_1 e S_2 do tubo indicado na figura possuem áreas 3,0 cm^2 e 2,0 cm^2, respectivamente. Um líquido de massa especifica $\rho = 0{,}80 \cdot 10^3$ kg/m^3 escoa pelo tubo e apresenta, no ponto 1, velocidade v_1 = 2,0 m/s e pressão $p_1 = 4{,}0 \cdot 10^4$ Pa. Os pontos 1 e 2 acham-se à mesma altura. Determine a velocidade e a pressão do líquido no ponto 2.



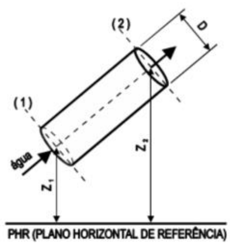
36) Um líquido de massa específica $\rho = 1{,}2 \cdot 10^3$ kg/m^3 flui pelo indicado na figura, passando pelo ponto 1 com velocidade v_1 = 5,0 m/s e pelo ponto 2 com velocidade v_2 = 2,0 m/s. Os pontos 1 e 2 acham-se à mesma altura, sendo a pressão no ponto 1 $P_1 = 2{,}4 \cdot 10^3$ Pa. Determine a pressão no ponto 2.



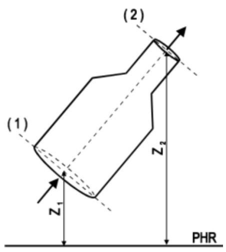
37) Um tudo de 300 mm de diâmetro está ligado por meio de uma redução, a outro de 100 mm de diâmetro, como mostra a figura. Os pontos 1 e 2 acham-se à mesma altura, sendo a pressão em 1 de $P_1 = 2{,}60 \cdot 10^5$ Pa, vazão de ϕ = 28,30 L/s. Dados: $\rho_{água}$ = 1.000 kg/m³ e g = 9,8 m/s². Calcule a pressão no ponto 2 para água (massa específica $\rho = 1{,}0 \cdot 10^3$ kg/m^3).



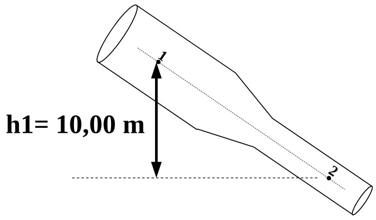
38) No esquema, há escoamento de água em regime permanente. Determinar a pressão na seção (2), supondo não haver perdas de carga. Dados: P_1 = 2,0 MPa ; $D_1 = D_2$; h_1 = 10,0 m ; h_2 = 60,0 m; $\rho_{água}$ = 1.000 kg/m³ e g = 9,8 m/s².



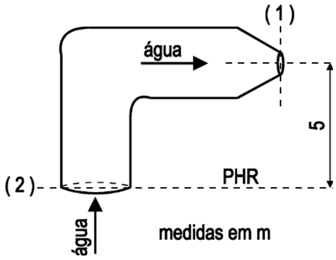
39) No esquema abaixo, há escoamento de água em regime permanente, com propriedades uniformes e isotermicamente. Determinar a pressão na seção (2), supondo não haver perdas de carga. Dados: P_1 = 6,0 MPa; v_1 = 2,0 m/s; A_1 = 30,0 cm^2; A_2 = 10,0 cm^2 ; h_1 = 1,0 m; h_2 = 30 m; $\rho_{água}$ = 1000 kg/m³ e g = 9,8 m/s².



40) Um conduto e constituído por dois trechos, com diâmetros de D_1 = 0,25 m e D_2 = 0,20 m, como mostra a figura abaixo. Sabendo-se que a pressão no ponto 1 é de P_1 = 147,10 kPa e que a velocidade no trecho 1 é de V_1 = 0,60 m/s, supondo não haver perdas de carga. Dados: $\rho_{água}$ = 1000 kg/m³ e g = 9,8 m/s².Calcule:
a) a velocidade no segundo trecho (V_2), em m/s;
b) a pressão no segundo trecho (P_2), em kPa;
c) a vazão no conduto. e a pressão no ponto 2.



41) No esquema, há escoamento de água em regime permanente, com propriedades uniformes e isotermicamente. Determinar a pressão na seção (2), supondo não haver perdas de carga. Dados: $P_1 = 1,0 \cdot 10^5$ Pa; v_1 = 3,0 m/s; D_1 = 1,0 cm ; D_2 = 10 cm ; $\rho_{água} = 1000$ kg/m^3 e g = 9,8 m/s².

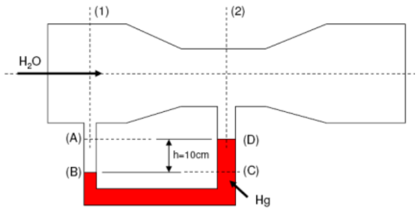


TUBO DE VENTURI

42) Um tubo Venturi é inserido numa canalização provocando um desnível de 0,50 m. Um líquido de massa específica igual a 1,0·10³ kg/m³ atravessa a canalização cuja de entrada tem diâmetro de 25,0 mm (diâmetro interno 21,6 mm) e o estrangulamento tem diâmetro de 20,0 mm (diâmetro interno 17,0 mm). Adotando g = 9,8 m/s². Calcule:

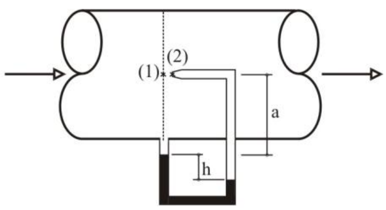
a) Velocidade de entrada;
b) Velocidade na seção do estrangulamento;
c) A vazão do líquido através da canalização.

43) Água escoa em regime permanente através do tubo de Venturi mostrado. Considere no trecho mostrado que as perdas são desprezíveis. A área da seção (1) é 20 cm² e a da seção (2) é 10 cm². Um manômetro de mercúrio é instalado entre as seções (1) e (2) e indica o desnível mostrado. Determine a vazão de água que escoa pelo tubo. Adotando g = 9,8 m/s².



TUBO DE PITOT

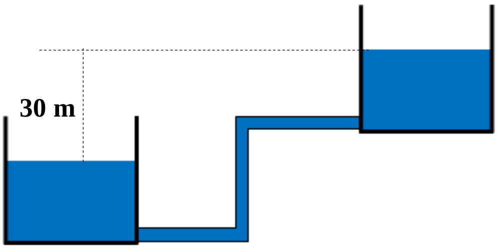
44) Um tubo de Pitot é inserido num escoamento conforme ilustrado. O fluido é água, e o líquido do manômetro é mercúrio. Determinar a velocidade do escoamento. Dados: g = 9,8 m/s^2; h = 0,10 m; $\rho_{água} = 1,0 \cdot 10^3$ kg/m^3 e $\rho_{mercúrio} = 13,3 \cdot 10^3$ kg/m^3.



45) O tubo de Pitot é usado para medir velocidade do ar nos aviões. Suponha que o tubo contém álcool e que a diferença de nível h é 26,0 cm. Qual é a velocidade do avião em relação ao ar? A massa específica do ar é 1,03 kg/m^3 e a do álcool é 810 kg/m^3.

EQUAÇÃO DE BERNOULLI NA PRESENÇA DE MÁQUINA

46) A Figura mostra o esquema de 2 reservatórios (A) e (B) onde a água flui de (A) para (B) sob uma vazão de 100 L/s. Sabendo-se que a diferença de nível (h) é de 30 metros e a tubulação de diâmetro de 300 mm, pede-se:

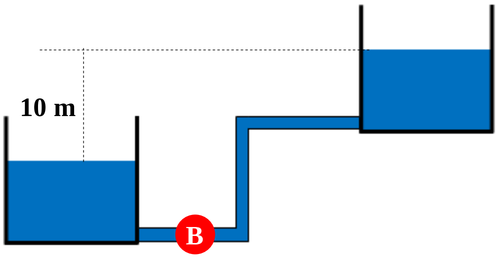


a) a velocidade da água na tubulação;

b) a perda de carga que está ocorrendo entre os reservatórios (A) e (B);

c) se colocarmos uma bomba hidráulica na tubulação próxima ao reservatório (B) e revertermos o processo, isto é, mandar a água de volta ao reservatório (A) sob mesma vazão, qual deverá ser a potência hidráulica fornecida por esta bomba? 0bs.: Considerar que o sentido do fluxo na tubulação não altera a perda de carga.

47) O propósito da bomba em um sistema de elevação de fluido é proporcionar-lhe energia para aumentar a sua energia potencial, ou seja, movimentá-lo de um nível de energia potencial baixo para um nível de energia potencial alto. De acordo com o esquema da Figura, a água deve ser bombeada de um reservatório para outro com um nível de elevação de 10,0 m entre as suas superfícies livres. A vazão da bomba é de ϕ = 0,10 m^3/s. Por simplificação, considera-se que o escoamento é permanente, incompressível e sem perda de carga. A pressão sobre as superfícies livres dos reservatórios é a pressão atmosférica, e a velocidade do fluido nas superfícies dos reservatórios é nula.



Determine:

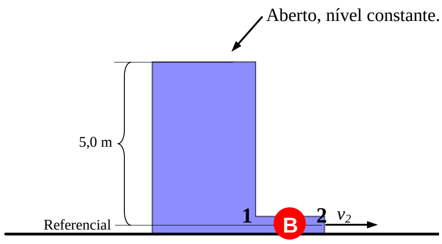
a) a altura à qual o fluido precisa ser elevado por uma bomba;

b) a pressão mínima que a bomba deve fornecer para realizar este bombeamento (pressão da saída da bomba), considerando $\gamma_{água} = 9800$ N/m^3;

c) potência da bomba se o rendimento é 85%.

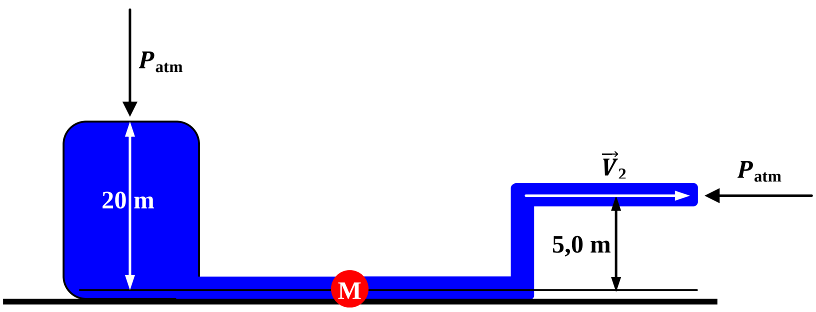
48) O reservatório de grandes dimensões da figura descarrega água para a atmosfera com uma velocidade de 5,0 m/s através de uma tubulação cuja área da seção transversal A = 10,0 cm^2. A potência da bomba é de 5,0 kW e rendimento de 80%. Determine a perda de carga do fluido entre os pontos 1 e 2.

Dados: g = 9,8 m/s^2 e ρ = 1000 kg/m^3.



49) O reservatório de grandes dimensões da figura descarrega água para a atmosfera através de uma tubulação cuja área da seção transversal A = 20,0 cm^2 e com uma vazão de ϕ = 15,0 L/s. As perdas por atrito viscoso na tubulação impõem uma perda de carga nesse processo equivalente a uma altura de 7,4 m.

Dados: g = 9,8 m/s^2 e ρ = 1000 kg/m^3.

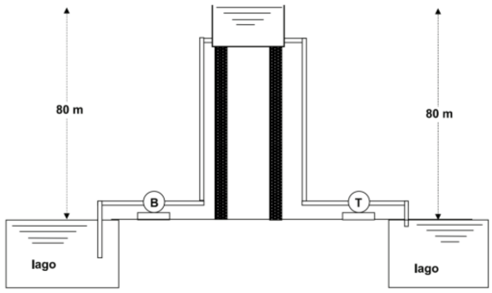


a) Determine a velocidade V_2;

b) Verificar se a máquina instalada é bomba ou turbina;

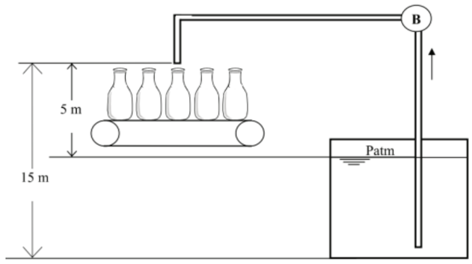
c) Determinar sua potência se o rendimento é 80 %.

50) Uma empresa de energia utiliza um sistema de “armazenamento” de energia conforme mostra a figura. A noite, quando sobra energia, é feito um bombeamento de água de um lago para um reservatório elevando e, durante o dia esta água é utilizada para gerar energia em uma turbina. Considerando que a vazão de água é sempre 500 L/s e que os rendimentos da bomba e da turbina são 70 %. Calcule:



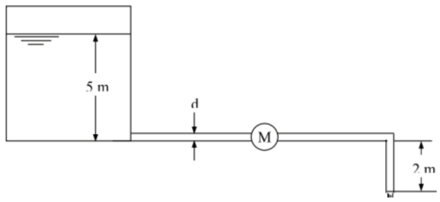
a) a potência necessária na bomba, em kW.
b) a potência necessária na turbina, em kW.

51) Em uma indústria de engarrafamento de água mineral, a água de um reservatório de grandes dimensões situado no piso inferior, deve ser transportada pela tubulação, conforme mostra a figura, para alimentar a linha de engarrafamento. O diâmetro da tubulação é de 1,6 cm. Considerando que a altura da bomba é 13,0 m e que a água se comporta como um fluido ideal, determine:



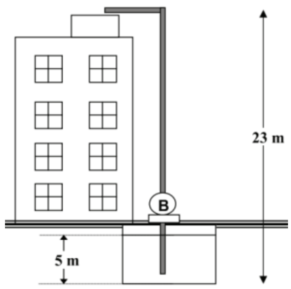
a) a vazão de água;
b) o número de garrafões de 20 L que podem ser enchidos por uma hora.

52) Água escoa através da instalação conforme a figura. A canalização que conduz a água tem um diâmetro interno de 10,0 cm.



a) Dado que a vazão de água é 126,33 L/s, determine a potência fornecida ou recebida pela água pela máquina M, indicando se é uma bomba ou turbina.
b) Determine a potência da máquina se o seu rendimento for 65%.

53) Em um pequeno edifício, uma bomba é utilizada para elevar água de um reservatório subterrâneo para uma caixa d’água situada no topo do edifício. A tubulação tem um diâmetro de 0,50 polegadas e a vazão de água é de 3,0 L/s. O reservatório subterrâneo tem grandes dimensões e está aberto para atmosfera. Dados: uma polegada = 2,54 cm e 1,0 HP = 745,7 W. Considerando a água um fluido ideal, determine:



a) a altura da bomba;
b) a potência da bomba, em HP, considerando que o seu rendimento é 65%.